

# Alternativni načini dubokog geološkog zbrinjavanja otpada

---

**Bratko, Tomislav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:206705>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij rudarstva

# Alternativni načini dubokog geološkog zbrinjavanja otpada

Diplomski rad

Tomislav Bratko

R 109

Zagreb, 2015.

## ALTERNATIVNI NAČINI DUBOKOG GEOLOŠKOG ZBRINJAVANJA OTPADA

TOMISLAV BRATKO

Diplomski rad izrađen: Sveučilišta u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

U diplomskom radu objašnjena je tehnologija zbrinjavanja otpada utiskivanjem, današnja iskustva u zbrinjavanju, radioaktivnog i ostalih vrsta otpada u Republici Hrvatskoj i u svijetu. Opisano je postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog fluida Kalinovac-6, te su dane i mogućnosti za unaprijeđenje tehnologije utiskivanja. U radu je također detaljno opisan koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine. Opisan je pojam, transport, obrada i utiskivanje opasnog otpada u svijetu.

Ključne riječi: utiskivanje otpada, opasni otpad, radioaktivni otpad,

Diplomski rad sadrži: 65 stranice, 2 tablice, 9 slika i 46 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a

Ocjenjivači: Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF-a  
Dr.sc. Domagoj Vulin, docent RGNF-a  
Dr.sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 20. studenog 2015.

University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology  
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

## ALTERNATIVE TECHNOLOGY OF DEEP GEOLOGICAL DISPOSAL OF WASTE

TOMISLAV BRATKO

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics,  
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

### Abstract

The master's thesis discussed the waste management technology by injecting, contemporary experience in waste management of radioactive and other types of waste in Croatia and around the world. It described the facility for disposal of technological fluid Kalinovac-6, and the options for improving the injection technology. As well as the detail concept of high level radioactivity waste disposal in deep boreholes. It also described the transport, treatment and injection of hazardous waste around the world.

Keywords: waste injection, hazardous waste, radioactive waste

Thesis contains: 65 pages, 2 tables, 9 pictures and 46 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor RGNF-a

Reviewers: PhD Želimir Veinović, Assistant Professor RGNF-a  
PhD Domagoj Vulin, Assistant Professor RGNF-a  
PhD Mario Dobrilović, Associate Professor RGNF-a

Date of defense: November 20, 2015

## SADRŽAJ

POPIS TABLICA .....	III
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
1. Uvod .....	1
2. Zbrinjavanje otpada utiskivanjem u bušotine .....	3
3. Zakonska regulativa RH i EU iz područja utiskivanja otpada u pogodne stijene .....	6
4. Zbrinjavanje otpada utiskivanjem u bušotine u RH .....	11
4.1. Pokretno postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog otpada .....	12
4.2. Utisna bušotina Kalinovac-6 .....	15
4.2.1. Hidrogeološki uvjeti .....	17
4.2.2. Tehnički uvjeti .....	18
4.3. Geološki opis polja .....	18
4.4. Dosadašnji radovi na utiskivanju .....	20
5. Mogućnosti za unaprijeđenja tehnologije .....	23
5.1. Jedinica za pripremu tehnološkog otpada .....	23
5.1.1. Cjelina za miješanje i djelomično usitnjavanje otpada .....	24
5.1.2. Cjelina za odvajanje i mljevenje krutih čestica s lijevkom za dodavanje kemikalija .....	25
6. Koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine .....	27
6.1. Pojam duboke bušotine za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada .....	27
6.2. Gradnja bušotina .....	29
6.2.1. Bušenje .....	30
6.2.2. Ispitivanje bušotina .....	31
6.2.3. Zaštitna kolona i završno opremanje .....	32

6.2.4. Referentna konstrukcija i operativni redosljed.....	35
6.3. Spremnici za otpad .....	36
6.3.1. Punjenje spremnika s otpadom.....	38
6.3.2. Testiranje spremnika za otpad .....	39
6.3.3. Konstrukcija i rukovanje spremnikom za otpad.....	40
6.4. Odlaganje otpada.....	42
6.4.1. Rukovanje na površini i zaštita.....	42
6.4.2. Odlaganje spremnika za otpad.....	44
6.4.3. Cementiranje spremnika i cementni čepovi.....	44
6.4.4. Sigurnost i monitoring.....	45
6.4.5. Referentna konstrukcija i operativni slijed.....	47
6.5. Brtvljenje i napuštanje bušotine .....	49
6.5.1. Zbijeni bentonitni brtveni sloj .....	51
6.5.2. Cementni brtveni sloj .....	52
6.5.3. Testiranje i provjera brtvenog sloja.....	53
6.5.4. Referentna konstrukcija i operativni slijed.....	53
6.6. Zaključci i preporučeni dodatni rad.....	55
7. Utiskivanje raznih vrsta otpada .....	57
7.1. Opasni otpad.....	57
7.1.1. Transport opasnog otpada.....	57
7.1.2. Obrada opasnog otpada .....	58
7.1.3. Utiskivanje opasnog otpada.....	59
8. Rasprava i zaključak.....	60
Literatura .....	61

## **POPIS TABLICA**

Tablica 2-1. Popis prihvatljivih metoda odlaganja otpada prema okvirnoj EU Direktivi o otpadu 2008/98/EC .....	9
Tablica 4-1. Količina utisnutog tehnološkog otpada po godinama .....	21

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz klasa utisnih bušotina (Muvrin et al., 2005). .....	4
Slika 4-1. Utisna bušotina Kalinovac-6.....	15
Slika 4-2. Konstrukcija bušotine s ugrađenom opremom (sadašnje stanje) (INA d.d., 2007). .....	17
Slika 5-1. Jedinica za pripremu tehnološkog otpada.....	23
Slika 6-1. Generalni koncept dubokih bušotina za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada (Park, 2009). .....	28
Slika 6-2. Shematski prikaz završetka bušotine (Arnold et al., 2011).....	34
Slika 6-3. Konstrukcija bušotine (Arnold et al., 2011).....	36
Slika 6-4. Osnovni dijelovi brtvenog sloja bušotine (Arnold et al, 2011).....	51
Slika 6-5. Predložena konstrukcija brtvenog sloja (Arnold et al., 2011).....	55



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
m	masa	kg
$\Phi$	promjer kolone	mm
p	tlak	Pa
t	vrijeme	s

## **POPIS KRATICA**

API– American Petroleum Institute (Američki naftni institut)

ASME– The American Society of Mechanical Engineers (Američko društvo inženjera mehanike)

BOPE– blow out prevention equipment

DOE–U.S. Department of Energy (Američki odjel za energiju)

EU– Europska unija

EWG–European Waste Catalogue (Europski katalog otpada)

IAEA – International Atomic Energy Agency (Međunarodna agencija za nuklearnu energiju)

Kal-6– Kalinovac-6

KSH–kalcij silikat hidrat

NAS–National Academy of Sciences (Nacionalna znanstvena akademija)

RH– Republika Hrvatska

SAD– Sjedinjene Američke Države

USEPA–United States Environmental Protection Agency (Američka agencija za zaštitu okoliša)

# 1. Uvod

Zbrinjavanje otpada odnosno tehnološkog fluida u podzemlje tehnologijom utiskivanja u duboke bušotine počinje se razvijati tridesetih godina dvadesetog stoljeća. Fluid koji se tada utiskivao bila je slojna voda. Prvi dokumentirani projekt zbrinjavanja slojne vode utiskivanjem u geološku formaciju, izvedena je u Teksasu 1938. godine (Janković, 2002). Stimulacijski radovi na bušotinama, što uključuje utiskivanje vode ili drugog fluida u proizvodnu formaciju radi održavanja tlaka u ležištima ugljikovodika su započeli u ranim 1930-im. Danas se u naftno proizvodnim procesima utiskuje milijune m<sup>3</sup>/dan u podzemne formacije. Utiskivanje industrijskih otpadnih fluida kreće 1950. godine kada tvrtka *Dow Chemical* utiskuje prve količine otpadne vode iz jednog od svojih pogona (Janković, 2002). Početkom 1960-ih *DuPont Chemical Corporation* počinje sa utiskivanjem asvojeg tehnološkog otpada u podzemlje (Janković, 2002).

U Republici Hrvatskoj, izgrađeno je preko 4300 istražnih i proizvodnih bušotina u kopnenim i podmorskim sedimentima. Zbrinjavanje tehnološkog otpada porijeklom iz naftnog gospodarstva utiskivanjem u negativne istražne ili iscrpljene proizvodne bušotine započeto je 90-tih godina u proizvodnoj praksi u R. Hrvatskoj. Tehnologija utiskivanja koja se tada primjenjivala sastojala se u tome što se samo tekuća komponenta otpada utiskivala u napuštenu, za tu svrhu, posebno odabranu bušotinu, dok se kruti dio otpada solidificiranjem neutralizirao i odlagao na lokaciji bušotine u postojeće isplačne jame, ili za tu svrhu posebno izgrađene deponije. U posljednje vrijeme unaprjeđenjem navedene tehnologije i tekuća i kruta faza tehnološkog otpada trajno se zbrinjava utiskivanjem u pažljivo odabrane, geološki i tehnički pogodne negativne bušotine (Brkić, 2001).

Razvojem ove tehnologije omogućeno je trajno, djelotvorno i sigurno zbrinjavanje tekuće i krute faze mnogih vrsta otpada (otpad iz naftne industrije, farmaceutske, prehrambene i kemijske industrije, metalurgije, radioaktivni otpad, te otpadne komunalne vode). Zbrinjavanjem otpada utiskivanjem smanjuju se ukupni troškovi zbrinjavanja i isključuje se bilo kakav negativan utjecaj na okoliš.

U ovom radu biti će objašnjena tehnologija zbrinjavanja otpada utiskivanjem, današnja iskustva u zbrinjavanju tehnološkog, radioaktivnog i ostalih vrsta otpada u svijetu i RH. Kao primjer u praksi RH detaljno će biti opisano postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog fluida Kalinovac-6, tehnologija koja se trenutno tamo koristi te mogućnosti unaprjeđenja tehnologije i zbrinjavanja nekih drugih vrsta otpada. Provjera

moćnostizbrinjavanja radioaktivnog otpada postojećom tehnologijom ili tehnologijom po uzoru na primjere u svijetu.

## 2. Zbrinjavanje otpada utiskivanjem u bušotine

Tehnologija zbrinjavanja otpada utiskivanjem u bušotine bazira se na utiskivanju tekuće i krute faze otpada u nepropusne stijene u Zemljinoj kori koje se nalaze na dubinama od nekoliko kilometara i koje su od ostalih geoloških slojeva izolirane nepropusnim naslagama stijena.

Postupak utiskivanja otpada može se podijeliti prema (Gaurina-Medimurec, 2009):

1. Tipu fluida koji se utiskuje:
  - Utiskivanje fluida bez krutih čestica (čisti fluid, engl. *solid-free fluids*) i
  - Utiskivanje fluida s krutim česticama (kašasti otpad, engl. *waste slurry*)
2. Tlaku utiskivanja:
  - Utiskivanje pri tlaku manjem od tlaka frakturiranja stijena i
  - Utiskivanje pri tlaku većem od tlaka frakturiranja stijena
3. Tipu utiskivanja:
  - Utiskivanje kroz tubing i perforaciju u koloni i
  - Utiskivanje kroz prstenasti prostor između dvije kolone (anularno).

Posebno važno za izbor podzemne i površinske opreme neophodne za realizaciju postupka utiskivanja je poznavanje statičkog slojnog tlaka i gradijenta tlaka frakturiranja, kao i drugih geoloških, hidrogeoloških, litostratigrafskih, tektonskih, geomehaničkih, te fizičkih parametara formacije u koju se utiskuje otpad. Npr. za utiskivanje otpada u formaciju sa slojnim tlakom nižim od hidrostatskog koristi se podzemna i površinska oprema niskog tlaka, dok se za odlaganje otpada frakturiranjem koristi podzemna i površinska oprema visokog tlaka (agregat za utiskivanje, visokotlačni vodovi, odgovarajuća bušotinska glava i dr.) (Šabović i Isabegović, 2012).

Za utiskivanje fluida bez čestica prvenstveno se primjenjuje postupak utiskivanja bez hidrauličkog frakturiranja naslaga. Ovaj postupak je razvijen u naftnom rudarstvu zbog trajnog i sigurnog zbrinjavanja tehnoloških otpadnih voda iz isplačnih jama, a šezdesetih godina se, s razvojem industrije, istim postupkom počinju zbrinjavati i otpadni fluidi iz kemijske industrije (Šabović i Isabegović, 2012).

Utiskivanje se, dakle, može obavljati ili kroz prstenasti prostor kanala bušotine ili kroz cijevi, tj. perforacije u koloni zaštitnih cijevi u formacije koje su izolirane od slojeva koje sadrže pitku vodu i ležišta ugljikovodika (Šabović i Isabegović, 2012).

Prema regulativi Američke Agencije za Zaštitu okoliša, utisne bušotine prikazane na slici 2-1., su podijeljene upet klasa. Za svaku klasu određena je vrsta otpada koju je moguće utiskivati (USEPA, 1998):

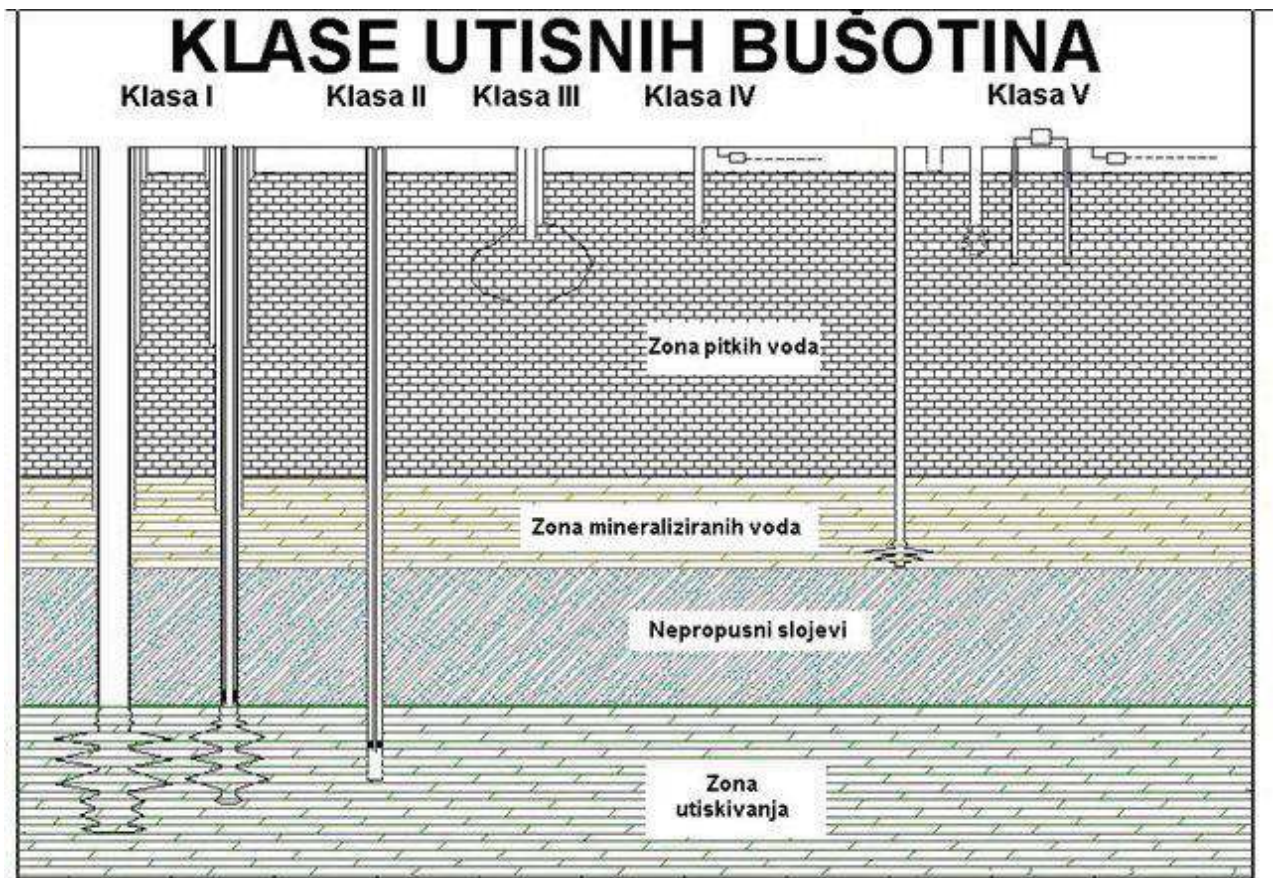
Klasa I - utiskivanje komunalnog ili industrijskog otpada (uključujući i opasni otpad) ispod najdubljih zona podzemnih izvora pitke vode (akvifera),

Klasa II - utiskivanje otpada iz istraživanja i proizvodnje nafte i plina,

Klasa III - utiskivanje fluida u procesu pridobivanja mineralnih sirovina ili energije,

Klasa IV - utiskivanje opasnog ili radioaktivnog otpada u/ili iznad podzemnih izvora pitke vode i

Klasa V - sve ostale utisne bušotine koje prethodno nisu spomenute, a kroz koje se utiskuju fluidi u/ ili iznad zona podzemnih izvora pitke vode.



Slika 2-1. Prikaz klasa utisnih bušotina (Muvrin et al., 2005).

Parametri koje kod utiskivanja treba uzeti u obzir su (Šabović i Isabegović, 2012):

- količina otpada koji se namjerava utisnuti,
- pristupačnost bušotini ili blizina bušotine otpadu,
- integritet bušotinske glave (opreme na ušću),
- adekvatna izolacija zone pitke vode,
- karakteristike utisne zone,
- adekvatna zaštita proizvodne zone,
- analiza prethodnih projekata utiskivanja na tom području,
- ekonomska isplativost-usporedba predloženog projekta utiskivanja s drugim metodama.

### **3. Zakonska regulativa RH i EU iz područja utiskivanja otpada u pogodne stijene**

Nacionalna strategija zaštite okoliša i Nacionalni plan djelovanja za okoliš, Strategija gospodarenja otpadom (N.N., 130/05.), Zakon o rudarstvu (N.N., 75/09.), Zakon o održivom gospodarenju otpadom (N.N., 94/13.) te Zakon o vodama (N.N., 153/09.) u RH su pravni temelji u okviru kojih je donesena potrebna prateća pravna regulativa vezana uz zbrinjavanje otpada (Pravilnik o gospodarenju otpadom (N.N., 23/14., 51/14.), Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (N.N., 114/15.), Pravilnik o vrstama otpada (N.N., 27/96.), Uredba o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada (N.N. 39/09.). U smjernicama za unapređenje sustava gospodarenja opasnim otpadom danim u Strategiji gospodarenja otpadom (N.N., 130/05.) i Pravilnik o gospodarenju otpadom (NN., 23/07., 111/07.) navedena je metoda zbrinjavanja otpada iz naftnog rudarstva utiskivanjem u duboke bušotine kao prihvatljiva za okoliš. Prema Strategiji gospodarenja otpadom (N.N., 130/05.) definirano je podzemno odlagalište otpada i postupci zbrinjavanja otpada.

Podzemno odlagalište otpada je definirano kao duboko zalegnuta, izolirana, hidrodinamički cjelovita geološka zamka sedimenata koja je raskrivena dubokom bušotinom kroz koju se otpad odlaže utiskivanjem. Postupak zbrinjavanja, označen u spomenutoj Strategiji kao D3, je definiran kao duboko utiskivanje otpada (na primjer utiskivanje otpada crpkama u bušotine, iscrpljena ležišta soli, prirodne šupljine itd.) (Brkić i Karasalihović-Sedlar, 2010).

U RH se od 1990. godine, u skladu s Glavnim tipskim rudarskim projektom "Sanacija isplačnih jama u INA-Naftaplina", počelo provoditi zbrinjavanje tehnološkog otpada, uglavnom tekuće faze iz isplačnih jama, utiskivanjem u, za tu svrhu posebno odabrane, negativne istražne ili iscrpljene proizvodne bušotine (Brkić et al., 2002). U Pravilniku o načinu i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagalište otpada (N.N., 117/07.) definirano je podzemno odlagalište: „Podzemno odlagalište je mjesto za stalno odlaganje otpada pod zemlju u pogodnu geološku šupljinu i/ili bušotinu nastalu rudarskom eksploatacijom i/ili istraživanjem. U podzemno odlagalište dozvoljeno je odlaganje inertnog, opasnog i neopasnog otpada, osim posebnih vrsta otpada koji bi tijekom odlaganja mogao doživjeti fizikalne, kemijske ili biološke promjene koje bi mogle ugroziti tijelo podzemnog odlagališta“. Otpad se može pohraniti u podzemno



odlagalište ukoliko Elaborat o procjeni rizika iz Dodatka 1 navedenog Pravilnika, kojim se daje prethodna procjena opasnosti za podzemno odlagalište otpada radi utvrđivanja utjecaja odloženog otpada na ukupnu biosferu, pokazuje da je razina izolacije i utjecaja lokacije podzemnog odlagališta otpada prihvatljiva za biosferu. Kod dokazivanja sigurnosti podzemnog odlagališta treba pokazati da otpad neće reagirati sa stijena na niti jedan kemijski i/ili fizikalni način koji bi oslabio čvrstoću i gustoću stijene i ugrozio samo odlaganje. Procjena rizika treba pokazati da nema niti jednog neprihvatljivog rizika ako prilikom korištenja odlagališta dođe do slabljenja izolatora (pokrovnih stijena). U slučaju trajnog odlaganja otpada procjena rizika mora obuhvatiti i dugoročne utjecaje. Procjena dugoročnog rizika treba garantirati da u podzemnom odlagalištu, zbog odloženog otpada, ni nakon zatvaranja utisne geološke formacije neće doći do nikakvih kontakata između onečišćivača i biosfere (Brkić i Karasalihović-Sedlar, 2010).

U sklopu Elaborata o procjeni rizika za podzemna odlagališta otpada potrebno je obuhvatiti sljedeći sadržaj (Pravilnik o načinu i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagalište otpada, N.N., 117/07.):

1. Geološku procjenu, koja uključuje ispitivanja i analize vrsta stijena, tla i topografije. Procjena mora dokazati prikladnost mjesta za podzemno odlaganje otpada;

2. Geomehaničku procjenu, kojom se stabilnost podzemnih prostora dokazuje prikladnim ispitivanjima i prognozama. Geomehaničkom procjenom potrebno je dokazati da ne treba očekivati nikakve značajne deformacije u samom prostoru ili na zemljinoj površini, koje bi oslabile izvedivost podzemnog odlagališta ili omogućile prolaz otpada do biosfere;

3. Hidrogeološku procjenu, koja obuhvaća detaljno ispitivanje svojstava podzemne vode s ciljem da se na temelju podataka o hidrauličkoj provodljivosti stijena, pukotina i vodnih gradijenata, ocijeni uzorak tokova podzemne vode u susjednim slojevima;

4. Geokemijsku procjenu, koja obuhvaća detaljno ispitivanje stijena i sastava podzemne vode kako bi se utvrdio trenutni sastav podzemne vode i njegove promjene s vremenom, zatim vrsta i učestalost otapanja mineralnih sirovina, kao i kvantitativni mineraloški opis matične stijene.

5. Procjenu utjecaja na biosferu i ispitivanje biosfere na koju može utjecati podzemno odlaganje. Potrebno je analizirati nulto stanje, kako bi se odredila razina odgovarajućih tvari u prirodnom okolišu.

6. Procjenu faza rada, kojom se dokazuje sigurnost rada podzemnog odlagališta te utvrđivanje nepostojanja neprihvatljivih rizika koji bi ugrozili odlaganje.

7. Procjenu dugoročnog utjecaja, kojom se garantira da u podzemnom odlagalištu, zbog odloženog otpada, ni nakon zatvaranja neće doći do nikakvih kontakata između onečišćivača i biosfere.

8. Procjenu utjecaja površinskih prihvatnih objekata koji moraju biti formirani i rukovođeni na način da se spriječi šteta za lokalni okoliš i ljudsko zdravlje.

9. Procjenu drugih rizika, koja se provodi zbog zaštite djelatnika.

Prema okvirnoj EU Direktivi o otpadu 2008/98/EC (Aneks I) odlaganje otpada označava bilo koju od prihvatljivih metoda prikazanih u tablici 2-1. Isti popis metoda navodi se i u Baselskoj konvenciji kao Aneks IV gdje se navodi da su to postupci koji ne vode k mogućnosti uporabe resursa, recikliranja, direktne ponovne uporabe ili alternativne uporabe.

U nekim zemljama, propisi usklađeni s EU direktivama, dozvoljavaju utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u pogodne stijene (Međimurec et al., 2005). Npr. u Poljskoj se tako utiskuju otpadni fluidi u propusne slojeve u djelomično ili potpuno iscrpljena ležišta nafte i plina. Najčešće se utiskuje slojna voda, isplaka preostala nakon bušenja, te tekuća faza iz isplačnih jama. U Mađarskoj propisi dozvoljavaju utiskivanje otpada iz istraživanja i proizvodnje nafte i plina u sigurne geološke formacije (Međimurec et al., 2005). Prema okvirnoj EU Direktivi o vodi (*Water Framework Directive 2000/60/EC*) zemlje članice mogu regulirati utiskivanje tekuće faze otpada nastalog pri istraživanju i proizvodnji ugljikovodika u iscrpljenje geološke formacije i utiskivanje vode u tehnološke svrhe (podržavanje slojnoga tlaka). Općenito, trenutno stanje u EU je povoljno za uvođenje utiskivanja otpada u pogodne stijene kao jedne od metoda za odlaganje industrijskog otpada. U prilog tome govore sljedeće činjenice (Sanfillipo et al., 2009):

- proizvodnja otpada u Europi neprekidno raste, te je dosegla prosječnu vrijednost od 517 kg po stanovniku godišnje,
- ekološki pritisak na većinu europskih zemalja je velik i raste zbog gusto naseljenih i industrijaliziranih područja,
- svijest građana o potrebi zaštite okoliša neprekidno raste i to je dovelo do objavljivanja i odobrenja strožih odredbi vezanih uz odlaganje otpada,
- unatoč nedovoljno određenim odredbama, do danas, spomenuta EU direktiva o otpadu već uključuje utiskivanje otpada kao odobrenu metodu za odlaganje otpada,

- Europa posjeduje pogodne geološke naslage za odlaganje otpada (Sjeverno more, Njemačko-poljski bazen, Panonski bazen, bazen rijeke Po u sjevernoj Italiji itd.).

Tablica 2-1. Popis prihvatljivih metoda odlaganja otpada prema okvirnoj EU Direktivi o otpadu 2008/98/EC

Postupci odlaganja otpada prema Direktivi o otpadu 2008/98/EC (Aneks I) i Pravilniku o gospodarenju otpadom N.N., 23/07. (Članak 4)	POSTUPCI ODLAGANJA
D1	Odlaganje u ili na tlo (npr. odlagalište itd.)
D2	Obrada zemljišta tj. obrada na tlu (npr. biološka razgradnja tekućina ili muljeva ispuštenih na tlo itd.)
D3	Duboko utiskivanje (npr. utiskivanje pumpabilnog otpada u bušotine, u rudnike soli, "prirodna" odlagališta itd.)
D4	Površinski bazeni (npr. odlaganje tekućeg ili muljevitog ispusta u jame, jezera ili lagune itd.)
D5	Posebno pripremljeno odlagalište (npr. odlaganje u pregratke/kazete izolirane podlogom i poklopcem, a koji su odvojeni i međusobno i od prirodnog okoliša)
D6	Ispuštanje u vodene sredine (osim mora i oceana)
D7	Ispuštanje u mora/oceane, uključujući i odlaganje na morsko dno
D8	Biološka obrada koja nije specificirana nigdje drugdje u ovom Aneksu, a koja daje konačne spojeve i smjese koji se odlažu na jedan od načina navedenih pod brojevima D1 do D12
D9...D15	Ostale metode

Razmatrajući prethodno navedene zakonske podloge kojima je definirana metoda zbrinjavanja otpada utiskivanjem u pogodne geološke naslage može se zaključiti da je u tom pogledu regulativa najodređenija u SAD-u (Muvrin et al., 2005) gdje se metoda prva počela primjenjivati. Iskustva SAD-a i regulativakoju je propisala USEPA, danas primjenjuju mnoge naftne kompanije koje djeluju na području EU. Unatoč nereguliranim odredbama vezanim uz metodu utiskivanja otpada u pogodne geološke naslage u zemljama EU, krovna EU Direktiva o otpadu 2008/98/EC (Sanfillipo et al., 2009) dozvoljava korištenje iste.

Republika Hrvatska započela je svoje pristupne pregovore za ulazak u EU 2005. godine i time je započelo usklađivanje zakonske regulative s pravnim stečevinama EU. Iste

godine RH je donijela Strategiju gospodarenja otpadom kojom je definirano Podzemno odlagalište kao geološka zamka i mjesto zbrinjavanja otpada te duboka bušotina kroz koju se otpad odlaže. Na taj način dana je mogućnost da se metoda zbrinjavanja otpada utiskivanjem u pogodne geološke naslage razrađuje kroz dokumente niže razine (zakone, pravilnike). Pravilnikom o gospodarenju otpadom (N.N., 23/07. članak 4) metoda odlaganja otpada utiskivanjem u duboke bušotine je usklađena s EU Direktivom o otpadu 2008/98/EC Annex 1. Praktično su metode odlaganja otpada prepisane iz Direktive u spomenuti Pravilnik. Usklađivanje je napravljeno i u području naziva otpada kroz tzv. Katalog otpada. Naime, Europski katalog otpada EWC (*engl. European Waste Catalogue*) sastoji se od popisa ključnih brojeva i opisa otpada, kojima se nastoji osigurati sustav razvrstavanja za bilo koji otpad proizveden u Europskoj uniji. To je sustav razvrstavanja koji upotrebljava šesteroznamenaste brojeve za opisivanje svih mogućih vrsta otpada. Katalog obuhvaća i otpad koji nastaje istraživanjem i vađenjem ruda, te preradom nafte i pročišćavanjem prirodnog plina. Uredbom o izmjenama i dopunama Uredbe o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada (N.N., 39/09.), RH je u potpunosti preuzela ključne brojeve i nazive otpada iz EWC-a. Razmatrajući EU Direktivu o vodama 2000/60/ EC koja dozvoljava deponiranje tekuće faze naftno-rudarskog otpada u pogodne stijene i utiskivanje slojne vode radi održavanja ležišnoga tlaka, novi Zakon o vodama (N.N., 153/09.) ispustio je tu mogućnost. Važeći Zakon o rudarstvu (N.N., 75/09.) također ne spominje utiskivanje otpada u pogodne geološke naslage, iako nositelj koncesije za eksploataciju ugljikovodika (u ovom slučaju INA d.d.) radove izvodi prema revidiranim rudarskim projektima budući se koristi bušotina kao rudarski objekt u svrhu zbrinjavanja otpada iz naftno-rudarske djelatnosti. Sam, zahvat utiskivanja otpada je u skladu s propisima iz područja gospodarenja otpadom i usklađen s EU direktivama što se koristi kod izrade određene dokumentacije ili ishođenja određenih dozvola za utiskivanje otpada (studija o utjecaju na okoliš, lokacijska dozvola, vodopravna dozvola) (Brkić i Karasalihović-Sedlar, 2010).

## **4. Zbrinjavanje otpada utiskivanjem u bušotine u RH**

INA-INDUSTRIJA NAFTE d.d. Zagreb, kojoj je osnovna djelatnost istraživanje i eksploatacija nafte i plina, u tehnološkim procesima generira određene količine tehnološkog otpada kojega je prema zakonskoj regulativi dužna trajno i na siguran način zbrinuti.

Za zbrinjavanje tehnološkog otpada nastalog pri rudarskim radovima na izradi, ispitivanju, remontu bušotina i procesnim postrojenjima primjenjuje se postupak prema provjerenom rudarskom projektu „Glavni tipski rudarski projekt- sanacija isplačnih jama u INA-Naftaplin“, travanj 1990. godine, odobren od Ministarstva energetike i industrije Republike Hrvatske od 03.12.1990. godine, kojim je odobreno izvođenje rudarskih radova na sanaciji isplačnih jama te zbrinjavanju tehnološkog otpada koji se prikupljao u njima.

Slijedom toga primijenjene su projektom određene metode, iz Glavnog rudarskog projekta- sanacija isplačnih jama u trgovačkom društvu INA-INDUSTRIJA NAFTE d.d. Zagreb, na sanaciji isplačnih jama i tehnološkog otpada iz proizvodnje nafte i plina tako da se tekuća faza utiskuje u za to odabrane geološke formacije, a preostali se kruti materijal metodom solidifikacije s vapnom neutralizirao i odlagao na mjestu nastanka.

Tehnološki otpad nastao pri procesu istraživanja i eksploatacije ugljikovodika (nafte i plina), uglavnom se rješavao na izgrađenim postrojenjima za regeneraciju tehnološkog otpada proizvodnih polja. Na tim postrojenjima izdvajana je tekuća faza gdje su ugljikovodici vraćani u proces, a izdvojena slojna voda utiskivana je s ostalom slojnom vodom u sloj za održavanje slojnog tlaka ili namjenske bušotine za zbrinjavanje.

Da bi se u potpunosti primijenila suvremena tehnologija obrade tehnološkog otpada potrebno je bilo izraditi pokretno postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog otpada na kojem će se navedeni tehnološki otpad prethodno pripremiti za utiskivanje u utisnu bušotinu.

Glavnim rudarskim projektom određen je sastav postrojenja kao i prikaz utisne bušotine u pogledu njenih osnovnih karakteristika za sigurno zbrinjavanje tehnološkog otpada u pogodne geološke formacije.

Pogodne, izolirane geološke formacije (podzemno odlagalište tehnološkog otpada) su duboke hidrodinamički cjelovite geološke zamke (ležišta), raskrivene bušotinom kroz koju se otpad utiskivanjem trajno i na siguran način uklanja iz biosfere i na taj način ostaje zarobljen u pornom sustavu stijene.

## 4.1. Pokretno postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog otpada

Pokretno postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog otpada iz procesa istraživanja i eksploatacije ugljikovodika u svom sastavu podijeljeno je na:

a) Osnovne cjeline:

1. jedinica za prihvrat tehnološkog otpada,
2. jedinica za pripremu suspenzije,
3. jedinica za pripremu tehnološkog otpada,
4. jedinica za upravljanje procesom,
5. jedinica za utiskivanje tehnološkog otpada,
6. jedinica za napajanje i razvod električne energije,
7. jedinica za prihvrat i obradu oborniskih voda.

b) Pomoćne cjeline:

8. transporter krutih čestica
9. niskotlačni (usisni) razdjelnik,
10. prihvrat obrađenog otpada,
11. visokotlačni vodovi i uređaji za mjerenje i registraciju,
12. rezervoarski prostor za prihvrat pogonskog goriva i maziva,
13. radno stambeni i skladišni prostor.

Jedinica za prihvrat tehnološkog otpada služi za prihvrat tekuće i muljevite faze tehnološkog otpada, sastoji se od dva bazena obujma 20 do 35 m<sup>3</sup> za prihvrat tehnološkog otpada. Jednog otvorenog bazena obujma 20 do 35 m<sup>3</sup> za prihvrat vode

Jedinica za pripremu suspenzije služi za pripremu suspenzije kojom se omogućuje održavanje reoloških svojstava tehnološkog otpada u jedinici za pripremu otpada.

Jedinica za pripremu tehnološkog otpada služi da se prikupljeni tekući ili muljeviti tehnološki otpad pripremi do takvih karakteristika koje su potrebne da bi se isti mogao utisnuti u bušotine.

Detaljniji opis jedinice za pripremu tehnološkog otpada biti će dan u poglavlju 5.1. Jedinica za pripremu tehnološkog otpada na pokretnom postrojenju za zbrinjavanje tehnološkog otpada postoji od samih početaka i obrađena je u Glavnom rudarskom

projektu ali se ne koristi jer ista nije navedena u odobrenom Dopunskom rudarskom projektu utiskivanja tehnološkog fluida u bušotinu Kal-6.

Jedincaza upravljanje procesom za upravljanje procesom je kontejnerskog tipa iz koje se kompjutorski vodi proces pripreme i obrade tehnološkog otpada koji se nalazi u jedinici za pripremu tehnološkog otpada. U jedinici su instalirani razvodni ormari s opremom za upravljanje elektroenergetskih i instrumentacijskih - upravljačkih uređaja, prostorom za smještaj opreme za pripremu instrumentacijskog zraka i kabelskim elektroenergetskim i upravljačkim razvodom.

Jedinica za utiskivanje tehnološkog otpada je visokotlačni agregat koji služi za utiskivanje obrađenog tehnološkog otpada u utisnu bušotinu svojim tehničkim karakteristikama mora zadovoljiti parametre utiskivanja definirane u geološko fizikalnoj osnovi za određenu bušotinu u koju se utiskuje tehnološki otpad. Parametri utiskivanja određeni su za svaku utisnu bušotinu temeljem provjerenog rudarskog projekta.

Jedinica za utiskivanje projektom je predviđena kao zasebna cjelina na skidu ili na pokretnom vozilu.

Jedinica za utiskivanje sljedećih je karakteristika:

- kapacitet utiskivanja u rasponu od 50 do 635 L/min,
- radni tlak u rasponu od 10 do 450 bara na izlazu jedinice.

Na jedinici za utiskivanje visokotlačnom agregatu postavljeni su uređaji za kontrolu, mjerenje i registraciju tlaka utiskivanja.

Iz registriranih veličina određuje se količina utisnutog tehnološkog otpada.

Na tlačnoj strani klipne pumpe postavljen je uređaj za podešavanje tlaka utiskivanja s zaustavljanjem rada klipne pumpe u slučaju prekoračenja tlaka koji je podešen.

Jedinica za napajanje i razvod električne energije služi za potrebe snabdijevanja električnom energijom elektromotornog pogona, vođenja i upravljanja procesom i pomoćnih trošila na postrojenju odabrani su sljedeći izvori napajanja:

- glavni diesel-generator snage 50 kVA
- pomoćni diesel-generator snage 60 kVA.

Glavni razvodni ormar opremljen je odgovarajućom automatikom za odvojeni rad generatora, potrebnom opremom za upravljanje i zaštitu trošila.

Jedinica za prihvatanje i obradu oborinskih voda sastoji se od separatora za odvajanje taloga, ulja i masnoće i/ili sabirne jame. Radi zaštite tla od slučajnog razlijevanja prilikom rada s tehnološkim otpadom na prostoru gdje su smještene osnovne jedinice postrojenja, osim jedinice za napajanje i razvod el. energije i radno stambeno-skladišnog prostora, postavlja se zaštitna folija s prihvatni oborinskim kanalima. Sva prikupljena oborinska voda s tog prostora odvodi se na pročišćavanje u separator za odvajanje taloga, ulja i masnoća. Volumen separatora je 2500 L i protoka od 5 L/s.

Na izlazu iz separatora pročišćena voda ispušta se u sabirnu jamu ili u pogodni recipijent. Koji će se oblik prihvata pročišćene vode koristiti ovisi o lokacijskim uvjetima konkretne bušotine i o fizikalno kemijskom izvješću uzetih uzoraka fluida iz separatora.

Prikupljene masnoće u separatoru prebacuju se odgovarajućim pumpama u prihvatne bazene i ulaze u ciklus pripreme za utiskivanje.

Transporter krutih čestica služi da se eventualno prikupljeni krupniji dio tehnološkog otpada koji se prikuplja na situ ili vibratoru prihvatnog bazena otpremi na jedinicu za pripremu i to na cjelinu s vibratorom i mlinom.

Transporter krutih čestica sastoji se od pužnog vijka kojeg pokreće elektromotor. Na dnu se nalazi prihvatni otvor u kojeg se ubacuju krupniji dio prikupljenog otpada sa sita prihvatnih bazena.

Radi jednostavnijeg rada i potreba manipulacije ili toka tehnološkog otpada prilikom obrade predviđen je niskotlačni (usisni) razdjelnik s brzo rastavljivim spojevima i leptir ventilima. Ispod priključnih spojeva na niskotlačnom razdjelniku postavljeni su prenosivi rezervoari za sprečavanje prolijevanjakoji imaju ulogu prikupljanja eventualno prolivene tekućine prilikom rastavljanja na spojnica.

Radi kontinuiteta utiskivanja prije utisnog agregata obrađeni otpad se prikuplja u otvoreni bazen. Prihvatni bazen je kapaciteta 10 m<sup>3</sup> i opremljen je miješalicom pokretanom elektromotorom.

Visokotlačni vodovi i uređaji za mjerenje i registraciju služe za otpremu obrađenog otpada u utisnu bušotinu i spojeni su međusobno na površini radnog prostora s tlačnom stranom utisnog agregata. Tlačni cjevovod sastavljen je od visoko kvalitetnih čelika s brzo rastavljivim spojem.



Prihvatni bazen za prihvat pogonskog diesel goriva sastoji se od spremnika volumena 20.000 litara i od agregata za istakanje.

Za smještaj maziva i ulja potrebnog za rad postrojenja postavljaju se tipski prenosivi kontejneri od 1000 litara i tipske bačve od 200 litara na postolja ispod kojih se nalaze odgovarajući prenosivi rezervoari za sprečavanje prolijevanja.

## 4.2. Utisna bušotina Kalinovac-6

Bušotina Kalinovac-6 prikazana na slici 4-1. ima status utisne bušotine odlukom Sektora proizvodnje nafte i plina, Služba za proizvodni inženjering od 2001. godine. Na bušotini nisu otkrivene zalihe ugljikovodika, a fizikalne karakteristike ležišta udovoljavaju za prihvat utisnutog tehnološkog otpada iz naftnog rudarstva u direktno ležište, pa je kao takova pogodna za odlaganje tehnološkog otpada prema hidrogeološkim i tehnološkim uvjetima.

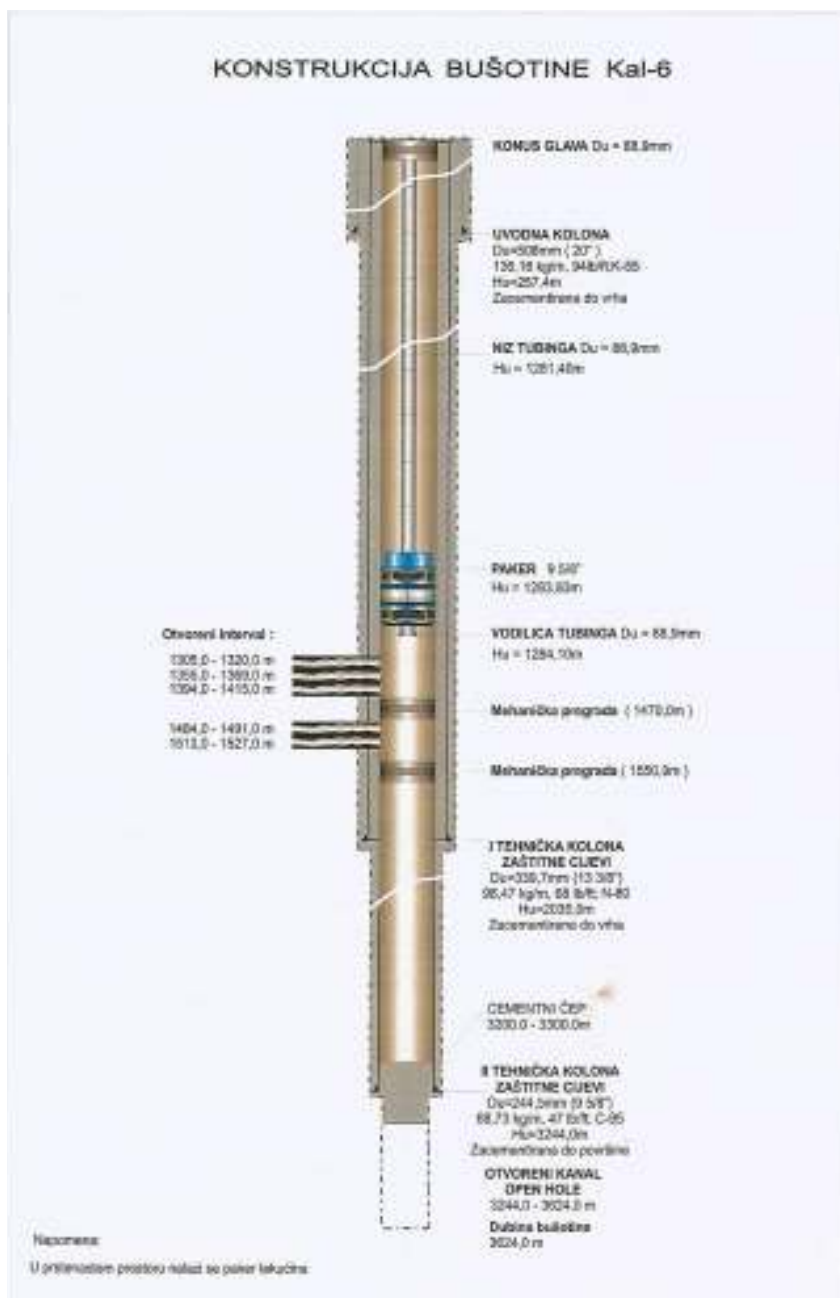


Slika 4-1. Utisna bušotina Kalinovac-6

Konstrukcija bušotine sastoji se od:

- Uvodne kolone:
  - promjer kolone:  $\Phi$  508,0 mm (20")
  - masa i kvaliteta: 136,04 kg/m
  - dubina ugradnje: 257,4 m
  - cementacija: do vrha cementna kaša dobivena na površinu.
- I. Tehničke kolone:
  - promjer kolone:  $\Phi$  339,7 mm ( $13\frac{3}{8}$ ")
  - masa i kvaliteta: 98,38 kg/m
  - dubina ugradnje: 2035 m
  - cementacija: do vrha cementna kaša dobivena na površinu.
- II. Tehničke kolone:
  - promjer kolone:  $\Phi$  244,5 mm ( $9\frac{5}{8}$ ")
  - masa i kvaliteta: 68,67 kg/m
  - dubina ugradnje: 3244 m
  - cementacija: do vrha cementna kaša dobivena na površinu.
- Otvorenog kanala:
  - promjer:  $\Phi$  2139,7 mm ( $8\frac{1}{2}$ ")
  - dubina: 3244 - 3624,0 m.

Konačna dubina bušotine je 3624,00 m (po dnevniku bušaćih šipki na Slici 4-2. je prikazana konstrukcija bušotine s ugrađenom opremom (sadašnje stanje).



Slika 4-2. Konstrukcija bušotine s ugrađenom opremom (sadašnje stanje) (INA d.d., 2007).

#### 4.2.1. Hidrogeološki uvjeti

Tehnološki otpad ne smije ulaziti u ležište podzemnih voda čiji kemijski sastav ukazuje da bi se ona mogla koristiti kao pitka ili tehnološka voda (bez obzira na dubinu), također ne smije se utiskivati ni u ležišta mineraliziranih i termalnih voda, ako one imaju mogućnost prirodnog napajanja (preko izdanka na površini).

Otpad se može utiskivati samo u ležišta, koja su zatvoreni hidrogeološki (hidrodinamički) sustav, ako udovoljavaju sljedećim posebnim uvjetima:

- Krovinske pokrovne stijene nemaju propusna svojstva, te imaju dovoljnu debljinu,
- Treba izbjegavati ležišta koja su presječena upletom uzdužnih i poprečnih rasjeda.

#### 4.2.2. Tehnički uvjeti

Izbušeni kanal bušotine treba zacijeviti zaštitnim cijevima (uvodna kolona, I/II tehnička kolona i proizvodna kolona) prema projektu bušotine.

Svaki međuprostor iza ugrađene kolone treba zacementirati cementnom kašom prema projektu bušotine, te snimiti CLB diagram. Potrebno je dokazati potpunu hermetičnost cementnog prstena iza zaštitnih cijevi ispitivanjem hermetičnosti ugrađenih kolona.

Ušće bušotine treba se opremiti bušotinskom glavom i erupcijskim uređajem prema projektu bušotine, a utiskivanje tehnološkog otpada izvodi se kroz ugrađeni niz tubinga, dok zona utiskivanja treba biti odvojena od ostalog dijela zacijevljenog kanala bušotine opremom za utiskivanje.

#### 4.3. Geološki opis polja

Bušotina Kalinovac-6 smještena je na sjeverozapadnom djelu plinsko-kondezatnog Polja Kalinovac. Polje se nalazi u Panonskom bazenu, Dravskoj potolini, u središnjem dijelu tektonskog rova "Duboka Drava- zapad" između polja Molve i Stari Gradac.

Struktura Kalinovac je asimetrična brahiantiklinala, pružanja sjeverozapad - jugoistok s blago naglašenim tjemnom u središnjem dijelu strukture. Rasjed sa horizontalnim desnim pomakom (*strike-slip*), pružanja približno sjever - jug, prolazi centralnim dijelom polja i spaja se reverznim rasjedom koji prolazi uz bušotinu Kal-6, te dijeli polje na dvije hidrodinamičke jedinice. Taj reverzni rasjed predstavlja barijeru protoku fluida koju čini spilitizirani dijabaz koji se probio uz taj duboki lom u srednjem trijasu

Prosječna duljina strukture je cca 14 km, a širina 4,5 km. Nagib sjevero istočnog krila iznosi približno 11°, jugoistočnog 9°, jugozapadnog 8° i sjeverozapadnog 3°.

Prema rezultatima geološkog praćenja bušotinom su raskrivene naslage sljedećih kronostratigrafskih jedinica:

Kvartar + Levantijski i dacijski kat	0 - 780 m
Gornji pont	780 - 1490 m
Donji pont	1490 - 2960 m
Gorji panon	2960 - 3340 m
Miocen	3340 - 3361 m
Mezozoik	3361 - 3518 m
Paleozoik	3518 - 3624 m

Prema analizama karotažnih dijagrama uočljiva je razlika slike krivulje otpora od dubine 250 m prema dubljim slojevima. Krivulje pokazuju česte izmjene pjeskovitih i glinovitih slojeva. Slojevi pijeska proslojeni su pjeskovitim glinama. Debljine pjeskovitih slojeva kreću se od 1 do 20 m. Neki su proslojci lapora debljine jednog do 3 metra vrlo čisti i predstavljaju barijeru između propusnih naslaga. Ispod dubine 2225 m počinje jasna definicija pješćanih slojeva i lapora. U podlozi tercijarnih stijena nalazi se temeljno gorje

U hidrološkom pogledu Podravska regija je izrazito vrijedna zbog svog velikog potencijala podzemne vode (kak slatkovodne tkao i termalne).

Osobito je vrijedna zona po kvaliteti i količini vode za piće u najmlađim geološkim naslagama iz kojih se crpi voda za snabdjevanje cijele regije, pa i susjednih (Bjelovarsko područje).

Dravsko područje pa tako i područje Kalinovca, od površine prema dubini, izgrađeno je od najmlađih šljunkovito-pjeskovitih i glinovitih slojeva kvartarne starosti. To su nevezane taložne različite granulacije. Šljunci su srednje do sitnozni, ali i s krupnim ulošcima, dok su pijesci krupno do sitnozni. S dubino sve više prevladava pjeskovita komponenta u odnosu na šljunak. Dubina ovih sedimenata dostiže više od 250 m. Debljina pojedinačnih šljunkovito-pjeskovitih slojeva dostiže i do 60 m. Ovaj kompleks naslaga svrstavamo u I. hidrogeološku zonu koja sudjeluje u globalnom kružnom ciklusu kretanja vode i koja se u podzemlju kreće.

Ispod ovog kompleksa naslaga, geološki najmlađeg, s izuzetno važnim zalihama recentne pitke vode, počinje II. hidrogeološka zona. Počinje slojevima pijeska i gline u međusobnoj izmjeni. Ovi slojevi nisu čisti tj. pijesci su zaglinjeni, a gline su pjeskovite. Pijesci su sitnozni i slabije propusni od pijesaka u I. hidrogeološkoj zoni. Pojedinačna

debjina pjeskovitih slojeva je od 1 m do preko 10 m, porozitetom do 30% i širokim rasponom propusnosti od 5 do 200 mD. Slojevi glina su znatno deblji u odnosu na slojeve pijeska, a zbog brze sedimentacije svi se slojevi odlikuju slabijom zbijenošću.

Na području polja Kalinovac vodonosnici s plitkom vodom nalaze se na dubini do 200 m. Ispod slijede slabopropusan glinovita podina debljine oko 70 m, koja odvaja vodonosnike prve hidrogeološke zone od vodonosnog kompleksa druge hidrogeološke zone. Vodonosni kompleks naslaga koje čine drugu hidrogeološku zonu približno je debljine 200 m zasićen je vodom pod arteškim tlakom s povišenom temperaturom i mineralizacijom.

Prema litološkom profilu bušotine Kal-6 između vodonosnika i pješćanih slojeva (1305,0 m - 1415,0 m) u koje se utiskuje tehnološki otpad nalazi se nepropusna pretežno laporovita naslaga ukupne debljine oko 800 m. Zbog takovog litološkog sastava terena može se sa sigurnošću tvrditi da ne postoji mogućnost hidrauličke veze između pješćenjačkih slojeva u koje se utiskuje tehnološki otpad i vodonosnika hidrogeološke zone.

Nadalje, utiskivanje tehnološkog otpada u bušotinu Kal-6 predstavlja u potpunosti zatvoreni sustav transporta otpada. Upravo taj zatvoreni proces transporta upućuje na zaključak da zahvat utiskivanja tijekom normalnog rada nema utjecaj na okoliš.

#### **4.4. Dosadašnji radovi na utiskivanju**

Nakon dobivenog Odobrenja za utiskivanje tehnološkog fluida u bušotinu Kalinovac-6 od studenog 2000. godine u bušotinu se kontinuirano utiskuje tehnološki fluid.

Utisna bušotina Kalinovac-6 opremljena je prema Dopunskom rudarskom projektu opremom za sigurno zbrinjavanje tekuće faze iz tehnološkog otpada u točno određeno ležište.

Slojevi u koje se utiskuje tehnološki otpad izolirani su od ostalih slojeva i od površine konstrukcijom bušotine tako da je onemogućeno zagađenje podzemnih voda. Komunikacija između kanala bušotine i ležišta u koje se utiskuje tehnološki otpad uspostavlja se kroz perforaciju kolone koje se nalaze na dubinama između 1305,0 m i 1415,0 m.

Količina utisnutog fluida tijekom godina varira i ovisi o intenzitetu rudarskih radova na istraživanju i eksploataciji ugljikovodika. Količina utisnutog tehnološkog otpada po godinama prikazana je u Tablici 4-1.

Tablica 4-1. Količina utisnutog tehnološkog otpada po godinama

	UTISNUTI TEHNOLOŠKI OTPAD PO GODINAMA						
Godina	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.
Količina m <sup>3</sup>	2300	6440	17648	13562	8092	10855	7739

Od izdavanja odobrenja za utiskivanje tehnološkog fluida 2000. godine pa do kraja 2006. godine u otvorene intervale utisnuto je ukupno 66.636 m<sup>3</sup> prema uvjetima utiskivanja danim u odobrenom Dopunskom rudarskom projektu.

Iz ovih podataka je vidljivo povećanje utisnutog tehnološkog otpada u odnosu na predviđenu odobrenu količinu.

Povećanje utisnutih količina tehnološkog otpada posljedica je povećanog intenziteta rudarskih radova na izradi novih bušotina, kapitalnih remonta proizvodnih bušotina i otpada koji je nastao u procesnim postrojenjima kod proizvodnje nafte i plina.

Iz navedenih podataka vidljivo je da odobreni rudarski projekt utiskivanja tehnološkog fluida u bušotinu Kal-6 nije mogao točno odrediti godišnju količinu stvarno nastalog otpada kao i kontinuitet utiskivanja jer je utiskivanje ovisilo o obimu rudarskih radova i nastaloj količini tehnološkog otpada pri tim radovima.

Za cijelo vrijeme utiskivanja stalno se prate parametri zasićenosti ležišta i tlaka utiskivanja na ušću kako ne bi došlo do prekoračenja dozvoljenog tlaka koji utječe na tlak loma formacije.

Od izdavanja rješenja do 2007. godine na bušotini Kalinovac-6 obavljena su tri remonta. Svrha obavljenih remontnih radova je ispiranja taloga iz bušotine nastalog kao posljedica sedimentacije "krupnih" čestica u tekućoj fazi zbog ne kontinuiranog utiskivanja.

Kako bi se smanjilo taloženje "krupnih" čestica iz tekuće faze tehnološkog otpada u bušotini prate se nova tehnološka saznanja u svijetu i temeljem toga izrađeno je pokretno postrojenje u kojem će se tekuća faza tehnološkog otpada prethodno pripremiti prije utiskivanja, odnosno "krupnije" čestice iz tekuće faze će se usitniti i obraditi kako bi novo nastala tekuća faza bila "fluidnija".

Pripremom tehnološkog otpada pokretnim postrojenjem za zbrinjavanje tehnološkog otpada smanjiti će se potreba za rudarskim radovima na pročišćavanju bušotine i obradi utisnih intervala, a isto tako produžiti će se vijek korištenja ležišta za sigurno zbrinjavanje tehnološkog otpada.



## 5. Mogućnosti za unaprijeđenja tehnologije

### 5.1. Jedinica za pripremu tehnološkog otpada

Jedinica za pripremu tehnološkog otpada prikazana na slici 5-1. čini zasebnu tehnološku cjelinu, a namjena je obrada tehnoloških fluida do postizanja karakteristika pogodnih za utiskivanje.

Iako se jedinica za pripremu tehnološkog otpada nalazi u Glavnom rudarskom projektu i na postrojenju od 2003. godine, njezin potencijal nikad nije dovoljno iskorišten, te se zbog određenih propusta ne koristi.

Proizvođač: MI SWACO, *MI Drilling fluids GmbH*, Germany

Godina proizvodnje: 2003.

Jedinica za pripremu otpada zbog svojih dimenzija i tehnologije sastavljena je od dvije cjeline:

1. cjelina za miješanje i djelomično usitnjavanje otpada- donji dio postrojenja
2. cjelina za odvajanje i mljevenje krutih čestica s lijevkom za dodavanje kemikalija- gornji dio postrojenja



Slika 5-1. Jedinica za pripremu tehnološkog otpada

### 5.1.1. Cjelina za miješanje i djelomično usitnjavanje otpada

Sa svojim sastavnim dijelovima-opremom smještena je unutar prenosivog postolja koji na dnu ima odgovarajući prihvatni bazen za prihvat fluida u slučaju ako dođe do izlivanja odnosno cijeđenja iz cijevi prilikom odvajanja.

Oprema za pripremu otpada razmještena je unutar konstrukcije na dostupnim mjestima tako da je omogućen nesmetan i siguran nadzor prilikom kontrole rada jedinice.

Osnovni dijelovi za miješanje i djelomično usitnjavanje otpada su:

1. miješalište za grube i fine čestice,
2. cirkulacione centrifugalne pumpe,
3. cjevovodi, ručni i automatski ventili.

Miješalište za grube i fine čestice konstrukcijski su posve jednake jedinice koje su procesno povezane prema priloženom procesno-instrumentalnom dijagramu. Dno miješališta je u obliku krnjeg stošca, a gornji dio je valjkastog oblika sa pokrovnom pločom na kojoj se nalazi otvor s poklopcem za pristup u unutrašnjost rezervoara. S unutarnje strane na stijenu miješališta postavljene su ljestve za pristup opremi na vrhu i ulazak u unutrašnjost. Na vrhu miješališta na pokrovnoj ploči montirana je miješalica koju pokreće elektromotor snage 3 kW i reduktorskim prijenosnim omjerom 1:26 preko zabrtvljenog središta. Unutar miješališta ugrađen je ultrazvučni pretvornik razine. S unutarnje strane miješališta ugrađene su odbojne (pregradne) ploče od vrha do dna s funkcijom razbijanja i dodatnog usitnjavanja fluida. Na dnu miješališta nalazi se izlazni otvor s cijevima za priključak na centrifugalne pumpe. Cijeli ciklus transporta, miješanja i usitnjavanja za vrijeme rada jedinice je zatvorene izvedbe. Svako miješalište je volumena 8,74 m<sup>3</sup> (55 bbl) i radi na atmosferskom tlaku a svi spojevi izvedeni su s brzim spojnicama. Radne veličine kontrole razine podešene su da s jedne strane operater ima kontinuirani nadzor nad stanjem razine u posudi, a s druge strane automatsku zaštitu od prelijevanja posude kao i zaštitu pumpi od gubitka razine na usisu pumpi.

Na istom postolju uz svako miješalište nalaze se po dvije centrifugalne pumpe s elektromotorima, a imaju funkciju miješanja, usitnjavanja i transporta otpadnih fluida. U svrhu usitnjavanja čestica kao i bolju trajnost pumpi, na dijelove rotora pumpi posebnim postupkom nanesen je sloj volfram karbida. Kapacitet svake centrifugalne pumpe je 230 m<sup>3</sup>/h a maksimalni tlak je 3,5 bar.

Miješalište i dijelovi cjevovoda opremljeni su zapornim organima za ručno i automatsko upravljanje punjenjem i pražnjenjem te kontrolom razine. Automatski rad jedinice upravljan je iz upravljačkog kontejnera. Cjevovodi su izvedeni od cijevi specijalne konstrukcije s brzo rastavljivim spojevima kako bi se u slučaju oštećenja nastalih erozijom mogla u izuzetnom kratkom roku izvršiti njihova izmjena. Sva oprema na cjevovodima i spojevi izvedeni su u klasi za tlak do 16 bara.

### **5.1.2. Cjelina za odvajanje i mljevenje krutih čestica s lijevkom za dodavanje kemikalija**

Sa svojim sastavnim dijelovima i opremom smještena je unutar prenosivog postolja koji je postavljen na konstrukciju za miješanje i djelomično usitnjavanje.

Oprema je razmještena unutar konstrukcije na dostupnim mjestima tako da je omogućen nesmetan i siguran nadzor prilikom rada jedinice.

Osnovni dijelovi za odvajanje i mljevenje krutih čestica s lijevkom za dodavanje kemikalija su:

1. odvajač krutih čestica (vibracijsko sito),
2. pužni transporter,
3. mlin za mljevenje krupnih čestica,
4. lijevak za dodavanje kemikalija.

Uloga odvajača krutih čestica (vibratora) je da izdvaja (selektira) veličinu čestice i usmjerava u miješalište za fine čestice i/ili na mlin za mljevenje. Odvajač krutih čestica je zapravo vibrator na kojem su montirana dva polja za postavljanje filtera sita za odvajanje čestica odgovarajuće veličine (300  $\mu\text{m}$ ). Odvojena tekućina sakuplja se u korito vibratora ispod sita i usmjerava u miješalište za fine čestice. Odvojeni krupni materijal prihvaća se na kraju sita u otvoreno korito pužnog transportera.

Pružni transporter ima funkciju da transportira izdvojeni prihvaćeni krupniji tehnološki otpad u prihvatnom otvoru ispod vibratora na mlin za mljevenje krupnih čestica.

Pružni transporter sastoji se od kućišta s prihvatnim otvorom, osovinom s pružnim vijkom i izlaznim otvorom usmjerenim u mlin za mljevenje krupnih čestica. Pružni transporter je postavljen na vlastitom postolju i učvršćen na konstrukciju jedinice. Pružni transporter pokretan je elektromotorom snage 1,5 kW.

Mlin za mljevenje krupnih čestica ima funkciju drobljenja (usitnjavanja) čestica većih od 2 do 3 mm. Mlin se sastoji od kućišta u kojem su smješteni valjci koji se okreću unutar plašta kućišta i na stijenkama plašta se obavlja drobljenje. Valjci u mlinu pokretani su elektromotorom snage 22 kW. U mlinu se čestice usitnjavaju na maksimalnu veličinu čestica do 300  $\mu\text{m}$ . Usitnjene čestice padaju u miješalište za krupne čestice.

## **6. Koncept odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine**

Referentni dizajn i operacijske procedure odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine, smatraju se izvedivim s trenutno dostupnim materijalima, i tehnologijom bušenja i inženjeringa. Osim toga, predloženi dizajn je razvijen kako bi bio u skladu s postojećim sigurnosnim i predviđenim regulatornim zahtjevima. Iako postoje brojne potencijalno isplativije alternative dizajna sustava za odlaganje u duboke bušotine, dizajn koji je opisan u ovom izvješću namjerno je jednostavan. Vjeruje se da bi se ovim jednostavnim dizajnom povećala vjerojatnost uspjeha početne provedbe projekta i kasnijeg poslovanja u odlaganju otpada. Taj predloženi dizajn može poslužiti kao osnova za usporedbu cijena i sigurnosti među alternativnim metodama (Arnold et al., 2011).

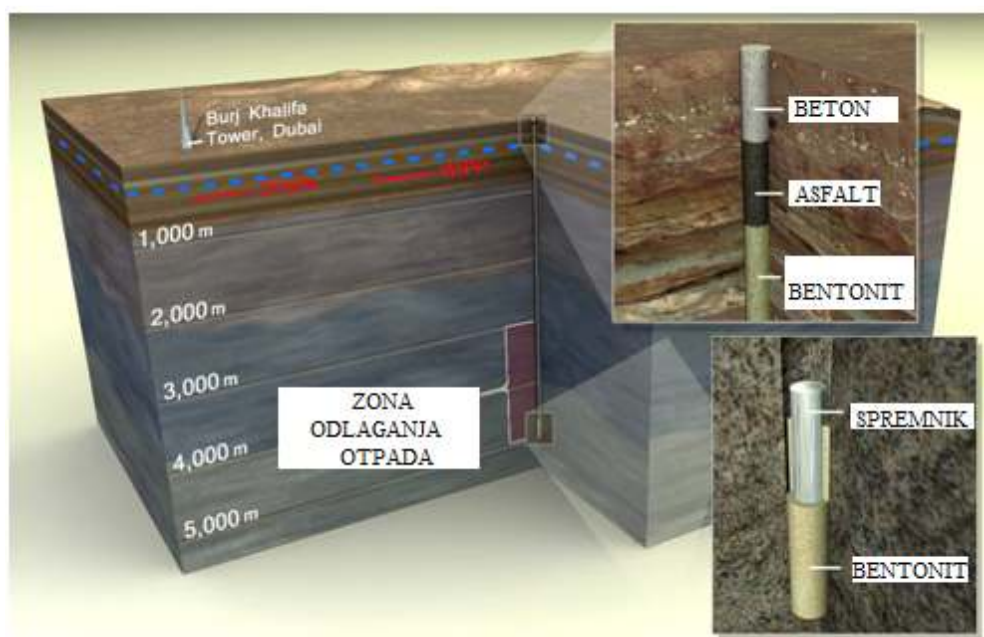
### **6.1. Pojam duboke bušotine za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada**

Duboke bušotine za odlaganje visoko radioaktivnog otpada smatraju se kao opcija za geološko izoliranje na mnogo godina, uključujući izvorne procjene Američke Nacionalne akademije znanosti iz 1957. (NAS, 1957). Međunarodni naponi u posljednjih pola stoljeća prema zbrinjavanju visoko radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva prvenstveno su usmjerene na iskopana odlagališta. Ipak, procijenjene duboke bušotine i dalje su povremeno na raspolaganju u nekoliko zemalja (NIREX, 2004). Ažuriranje konceptualnih procjena raspoloživih dubokih bušotina i preliminarne procjene uspješnosti također su završene (Brady et al., 2009). Ove studije su identificirane bez temeljnih nedostataka u pogledu sigurnosti i provedbe koncepta raspoloživih dubokih bušotina. Generalni koncept dubokih bušotina za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada prikazan je na slici 6-1.

Koncept se sastoji od bušenja bušotina u kristalastu temeljnu stijenu na dubinu od oko 5000 m, spremnici koji sadrže iskorišteno radioaktivno gorivo ili vitrificirani radioaktivni otpad iz prerade odlažu se u donji dio bušotine na oko 2000, a gornjih oko 3000 metara se brtvi. Kao što je prikazano na slici 6-1., sustav za odlaganje otpada u duboke bušotine nekoliko puta je dublji od tipičnih iskopanih odlagališta, što rezultira većom prirodnom izolacijom površine i pripovršinskog okoliša. Zona zbrinjavanja u jednoj

bušotini može sadržavati oko 400 spremnika s otpadom od oko 5 m dužine. Brtveni sustav u bušotini će se sastojati od naizmjeničnih slojeva kompaktne bentonitne gline i betona. Asfalt se također može koristiti u plićim dijelovima brtvenog sustava.

Nekoliko čimbenika ukazuje na to da je koncept zbrinjavanja otpada u duboke bušotine održiv i siguran. Kristalaste temeljne stijene relativno su česte na dubini od 2000 do 5000 m u stabilnom kontinentalnom dijelu, što sugerira da postoji niz odgovarajućih mjesta (O'Brien et al., 1979; Heiken et al., 1996). Postojeća tehnologija bušenja omogućuje pouzdanu konstrukciju bušotine dovoljno velikog promjera do dubine od 5000 m na prethodno procijenjene vrijednosti od oko \$ 20 milijuna svaka (Brady et al., 2009). Predviđena količina otpada iz sadašnje flote nuklearnih reaktora u SAD-u može biti odložena kao iskorišteni gorivi članci u oko 950 bušotina (Brady et al., 2009). Ne tehnička prednost koju nudi koncept dubokih bušotina više od koncepta skladišta jest olakšavanje porasta izgradnje i odlaganje na više, možda regionalnih, lokacija. Mala propusnost i visok salinitet u dubokom kontinentalnom kristalastom temeljnom sloju stijena na mnogim mjestima ukazuje na izuzetno ograničenu interakciju s plitkim svježim izvorima podzemne vode (Park et al., 2009) (tipično niža granica je prikazana isprekidanom plavom crtom na slici 6-1.), koji su najvjerojatniji put za izloženost ljudi. Smanjenje geokemijskih uvjeta u dubokom podzemlju ograničavaju topljivost i poboljšavaju sorpciju mnogih radionuklida u otpadu, što dovodi do smanjene pokretljivosti u podzemne vode.



Slika 6-1. Generalni koncept dubokih bušotina za zbrinjavanje visoko radioaktivnog otpada (Park, 2009).

## 6.2. Gradnja bušotina

Tehnički zahtjevi predloženog dizajna uključuju (Arnold et al., 2011):

- Izbušena i završena bušotina na dubini od oko 5000 m sa zonom odlaganja otpada na dubinama između 3000 i 5000 m.
- Bušotina i zaštitna kolona moraju imati dovoljnu stabilnost i trajno pružiti visoku razinu sigurnosti da spremnici s otpadom budu postavljeni na željenoj dubini, s minimalnom vjerojatnosti da spremnici zaglave pri postavljanju.
- Bušotina i zaštitna kolona moraju imati dovoljno veliki promjer za trajno prihvaćanje i pohranjivanje otpada u spremnicima.
- Odstupanje bušotine od predviđene putanje mora biti kontrolirano tako da je udaljenost između bilo koje dvije bušotine veća od 50 m na dubini od 5000 m. Modeliranje bušotina tijekom izrade predloženog dizajna je pokazalo da je toplinska interferencija između dvije bušotine relativno mala za razmak veći od 50 m. Bušenje višestrukih bušotina u nizu mora isključivati mogućnost presretanja bušotina s već postojećim bušotinama u kojima je već postavljen otpad. Razmak intervala odlaganja otpada na mjestima s više bušotina mora ispunjavati toplinske uvjete upravljanja odlaganja.
- Bušotina i zaštitna kolona moraju biti dizajnirane tako da zaštitna kolona može biti uklonjena iz intervala bušotine u kojem se podešava brtveni sloj. Optimalna izvedba brtvenog sloja bušotine zahtjeva izravan kontakt brtvenog sloja i stijenke bušotine.
- Kolona i talog u zoni odlaganja otpada moraju omogućiti termalnu ekspanziju tekućine i tok u okruženju primarne stijene kako bi se izbjeglo nenormalno visok tlak tekućine u okruženju spremnika s otpadom.
- Bušenje bušotina i izgradnja mora biti provedena na način koji omogućuje karakterizaciju primarne stijene u zoni odlaganja otpada prije trajnog pohranjivanja otpada.
- Bušotina i zaštitna kolona moraju imati dovoljnu stabilnost i trajnost da bi vađenje spremnika za otpad tijekom operativnog razdoblja bilo moguće, ako je to potrebno. Operativno vrijeme se definira kao vrijeme koje traje do trenutka kad se zabrtve sve bušotine i dok se završi likvidacija svih bušotina.

### 6.2.1. Bušenje

Dizajn bušotine je baziran na kriterijima koji mogu biti ispunjeni s trenutno postojećom tehnologijom. Dubina bušotine nije specificirana, projekti u Australiji, Francuskoj i SAD-u imaju postignute dubine u granitima između 4,5 i 5 kilometara, iako su promjeri tih bušotina manji nego je potrebno. Bušotine predloženog dizajna iz ovog izvješća sa promjerom dna bušotine od 17" (0,43 m) su izvedive, ne postoji niti jedno tehničko pitanje koje predstavlja prepreku za bušenje tog promjera na toj dubini. Trenutna geotermalna praksa je bitna jer se geotermalni resursi obično nalaze u tvrdim, eruptivnim stijinama i zato što protoci geotermalne proizvodnje zahtijevaju velike promjere bušotine. Danom usporedbom, bušenje će najvjerojatnije biti izvedeno velikim konvencionalnim bušaćim postrojenjem ili rotacijskom cijevi za tvrde formacije, s umetkom od volfram-karbida, kliznim ležajem, žrvanjskim dlijetom ili eventualno dubinska turbina s dijamantnim dlijetom. Izbor između ove dvije metode i odabir specifičnih dlijeta i radnih parametara (brzina rotacije, hidraulika i težina dlijeta) će biti određeni prema svojstvima stijene na određenoj lokaciji.

Uvjet da minimalna udaljenost između intervala skladištenja pojedinih bušotina treba biti minimalno 50 m podrazumijeva prosječnu devijaciju trajektorije bušotine od  $0.6^\circ$ , pa to zahtjeva kontrolirano usmjereno bušenje. Postoji nekoliko načina da bi se to postiglo sa standardnom tehnologijom.

Bušenje u kristaličnu (sedimentnu) stijenu biti će sporo, moguća brzina bušenja manja i od 1 m/h, a vijek dlijeta će biti kratak što podrazumijeva česte zamjene dlijeta. Ovi uvjeti, zajedno s velikim promjerima i čimbenicima bušenja, znače da troškovi bušotine neće biti samo visoki, nego će cijela izvedba biti nepredvidljiva, pogotovo za prvu bušotinu na tom području.

Kao i u svakom bušačem projektu, dizajn zaštitne kolone je srž definicije kanala bušotine i određuje većinu aspekata kako će se bušotina bušiti. Također je važno da se uklone rizici zaglavlivanja otpada tijekom pohranjivanja (Arnold et al., 2011).

Veliki dio troškova bušenja odlazi na velike promjere bušotina, stoga bi možda bilo jeftinije da prva bušotina na određenoj lokaciji bude istraživačka, bez namjere zbrinjavanja otpada u njoj. Smanjenjem promjera dna bušotine na najmanju dimenziju koja omogućuje izradu karotaže i testova (po nalogu 8,5" (0,22 m)) dobilo bi se značajno smanjenje troškova. Manja veličina bušaćeg postrojenja, manje materijala za zacjevljivanje i cementiranje, a niža cijena opreme za karotažu i testiranje za istraživačku bušotinu će



rezultirati nižim troškovima bušotine za odlaganje većeg promjera. Iskustvo pilot bušotine također će biti izuzetno korisno u predviđanju mjesta mogućih problema u velikim bušotinama i u odabiru dlijeta i bušaće tehnike. Istraživačka bušotina će biti začepljena i zabrtvljena i označena na sličan način kao i bušotina za odlaganje. Istraživačka bušotina će uvelike pojednostavniti karotažu i jezgrovanje (Arnold et al., 2011).

### **6.2.2. Ispitivanje bušotina**

Ispitivačka bušotina i podzemna karakterizacija na određenom mjestu nastaviti će s početnim utvrđivanjem opće podobnosti te lokacije za odlaganje u duboke bušotine na određenu karakterizaciju primarne stijene u zoni odlaganja pojedine bušotine. S obzirom na opći nedostatak informacija o geologiji na dubini od 3 do 5 km u kristalnoj/sedimentnoj primarnoj stijeni, prva bušotina na potencijalnom odlagalištu će koristiti za opisivanje geologije, hidrologije i geološke povijesti kristalnih stijena i fluida.

Zbog veće geološke izolacije kod odlaganja u duboke bušotine u odnosu na plića iskopana geološka odlagališta, zahtjevi karakterizacije biti će limitirani u pogledu širine i detalja. Na primjer, detaljne karakteristike plitkog hidrološkog sustava poput infiltracije, napajanje zone zasićenja podzemne vode, podzemnog toka vode u gornjih nekoliko stotina metara i propuštanja, uglavnom se odvaja od hidrogeološkog sustava na dubinama većim od 3 km u stabilnim kontinentalnim regijama i tako ograničava značaj za sigurnost sustava za odlaganje otpada u duboke bušotine. Nekoliko ključnih karakteristika sustava na dubini, kao što su visoki salinitet slojne vode, geomehanički redukcijски uvjeti i nedostatak fluida pod podtlakom, vrlo su važne da se otpad izolira. Međutim, detaljna karakterizacija nekih aspekata primarne stijene poput složenosti pukotinske mreže, što bi bilo potrebno za plitka iskopana geološka skladišta neće biti potrebna za duboke bušotine. Glavne hidrostrukturalne značajke kao rasjedne i pukotinske zone mogle bi biti značajne za sigurnost lokacije, ali bilo bi za očekivati da se manje značajke pukotinske mreže ponašaju kao kontinuum na području od primarne sedimentne strukture do površine (najmanje 3000 m). Nadalje, u nedostatku značajnih potiskivajućih gradijenata u potencijalu tekućine (npr. uvjeti podtlaka u dubini), tok podzemne vode prema površini će biti zanemariv, bez obzira na povezanost pukotinske mreže.

Početna bušotina na odlagalištu koristiti će se za prikupljanje podataka koristeći povremeno jezgrovanje, testiranje bušotine kroz bušaće šipke, geofizičku karotažu i

tlačnim testom. Periodično ili bočno jezgrovanje u bušotini će se koristiti za dobivanje netaknutog uzorka stijene za geološka, mineraloška, geomehanička i geofizička karakteriziranja. Godine zapisivanja, pokazatelji stresa (npr. bušotinske pukotine i orijentacija pukotina), geokemijski i izotopski podaci će se koristiti za dobivanje zaključaka o geološkoj, tektonskoj i hidrogeološkoj povijesti primarne stijene. Mineraloški, petrofizikalni i geofizički podaci, kao što su mineraloški sastav, poroznost i gustoća, će se koristiti za izračunavanje retardacije i migracije radionuklida. Geofizički podaci o toplinskoj vodljivosti i koeficijent toplinskog širenja će se koristiti za procjenu utjecaja otpada na toplinske i mehaničke odgovore sustava. *Go/no-go* kriteriji će se utvrditi prije početka bušenja, kako bih se identificirala specifična prekoračenja potrebna za diskvalifikaciju određenog mjesta ili bušotine. Testovima slojnih tlakova udarnog bušenja mjeriti će vertikalni gradijent mogućeg fluida u okolnim uvjetima. Geofizička karotaža potencijalno može uključivati veliku grupu mjerenja, uključujući bušotinski kavernomjer, temperaturu, jakost magnetskog polja, otpor, spontani potencijal, sken mikroformacija, brzinu prostiranja valova i neutronske karotaže. Karotažni podaci će osigurati kontinuirane litološke informacije, stabilnost bušotine, širenje pukotina i procjenu ušća, zone podzemne vode, anizotropije horizontalnih tlakova i poroznosti. Test isplačnih pumpi koristiti će se za procjenu propusnosti primarne stijene u zbijenim intervalima.

Naknadne bušotine na istom mjestu biti će okarakterizirane kao podskup bušotinske karotaže korištene na početnoj bušotini. Bušotinski kavernomjer, temperatura, sken karotaže mikroformacija biti će dovoljni za identifikaciju zona nestabilnosti stijenske bušotine, gustoće pukotina ili protjecanja tekućine. Informacije o tim primarnim stijenama ili uvjetima u bušotini će se koristiti u pozicioniranju brtvenog sloja, cementnog čepa i potencijalno identificirati segmente bušotina neprikladne za pohranjivanje spremnika s otpadom (Arnold et al., 2011).

### **6.2.3. Zaštitna kolona i završno opremanje**

S obzirom na to da se u bušotinu moraju smjestiti spremnici s otpadom vanjskog promjera 10,75" (0,27 m) i spojnica između njih vanjskog promjera 11,75" (0,30 m) kroz dubinski interval od otprilike 3000 do 5000 metara, glavni kriteriji za razmatranje konstrukcije zaštitne kolone se obično rješavaju pomoću standardne protuerupcijske prevencijske opreme na zaštitnoj koloni čiji se jedan dio nalazi na površini i na svim

sljedećim nizovima zaštitne kolone, dok se problemi čvrstoće prvenstveno kontroliraju zahtjevima tlaka gnječenja. Bazirano na kanalu bušotine shematski prikazanom u poglavlju 2.5, razmatranje konstrukcije po svakom intervalu posebno objašnjeno je detaljno u nastavku. Shematski prikaz završetka bušotine prikazan je na slici 6-2.

Konduktor je obično ravna zacementirana cijev, a postavljena je na dubini od 50 do 100 stopa (15 do 30 m). Konduktor osigurava protok cijevi i spriječava krhotine sa površine da padnu u bušotinu dok se buši uvodna zaštitna kolona.

Uvodna zaštitna kolona: maksimalana dubina uvodne zaštitne kolone kontrolirana je zahtjevima BOPE-a (koji je, koliko duboko će regulatorne agencije dopustiti bušenje bez kontrole bušotine). Materijal zaštitne kolone je standardiziran, minimalna težina cijevi je 235 lb/ft (350 kg/m) i s prinosom vlačne sile od 56,000 psi (390 MPa). Ta svojstva zaštitnoj koloni daju dovoljno čvrstoće da izdrži svoju vlastitu težinu viseći u bušotini i da izdrži vanjski pritisak od 772 psi (5,32 MPa). Koristeći gradijent pornog tlaka od 0,433 psi/ft (0,0098 MPa/m), diferencijalni vanjski tlak na praznu cijev će biti 649 psi (4,47 MPa), tako da opasnost od loma cijevi nije problem. Ova zaštitna kolona cementirana je do površine te će imati BOPE instaliran nakon cementiranja.

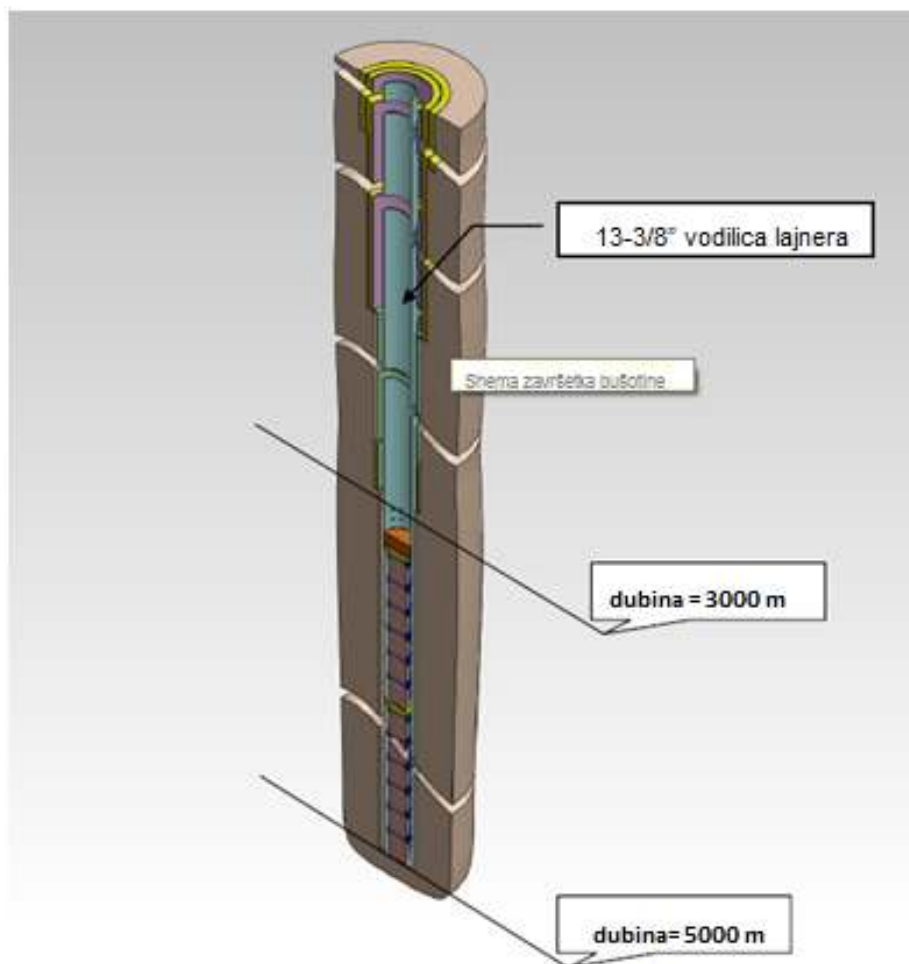
Tehnička zaštitna kolona biti će napravljena od čvršćeg (125,000 psi, 862 MPa) materijala. Postavlja se od površine do oko 1500 m i cementira se po punoj dužini. Ima vjerojatnost sloma pri 1170 psi (8,07 MPa), a vanjski tlak na 1500 m će biti 2131 psi (14,7 MPa), tako da se ne može dopustiti da cijev bude prazna. Razina tekućine mora se održavati na ili iznad 690 m ispod površine.

Međulajner, ovaj lajner je obješen s kraja tehničke zaštitne kolone i ide do 3000m . Na oko 1500 m od kraja lajnera biti će kolčak za višestupanjsku cementaciju, to je uređaj koji može napraviti prolaz iz unutrašnjosti zaštitne kolone do anulusa. Budući da se gornja sekcija zaštitne kolone mora ukloniti kako bi se postavio brtveni sloj, gornja sekcija se ne cementira, dakle nakon što cement iscuri u anulus do točke iznad kolčka za višestupanjsku cementaciju, on će se otvoriti i cement koji je iznad cirkulirat će van s isplakom. Pozicija kolčka višestupanjske cementacije bit će određena prema dubini granitne formacije. Za učinkovit brtveni sloj, kolčak za višestupanjsku cementaciju mora biti najmanje 100 m ispod vrha granita. Ovaj lajner također ima vjerojatnost sloma manji od pornog tlaka na dubini, tako da se ne može dopustiti da bude prazan- razina tekućine mora se održavati na ili iznad 1530 m ispod površine.

Vodilica lajnera (lajner je tip kolone zaštitnih cijevi) (13,38", 0,34 m casing in 17", 0,43 m hole) visi od kraja druge tehničke kolone i ide do dna zone odlaganja od oko 5000

m. Lajner na sebi ima proreze ili perforacije koje dopuštaju povećanje tlaka uzrokovanog toplinom spremnika ispuštenom u formaciju. To također znači da lajner neće osjetiti nikakav diferencijalni tlak gnječenja, stoga je to jedini uvjet stabilnosti koji podržava svoju težinu dok je ugrađena u bušotinu.

Vodilica lajnera do ušća bušotine (13,38", 0,34 m casing in 18,63", 0,47 m casing) ugrađuje se od površine do vodilice lajnera na kraju druge tehničke kolone, tako će putanja za spremnike kada su utisnuti u zonu odlaganja biti glatka i konstantnog promjera. Ovo kućište biti će u potpunosti uklonjeno kada se postave svi spremnici s otpadom, tako da nije zacementirano niti zabrtvljeno na dnu i neće se vidjeti nikakvi tlakovi gnječenja (Arnold et al., 2011).



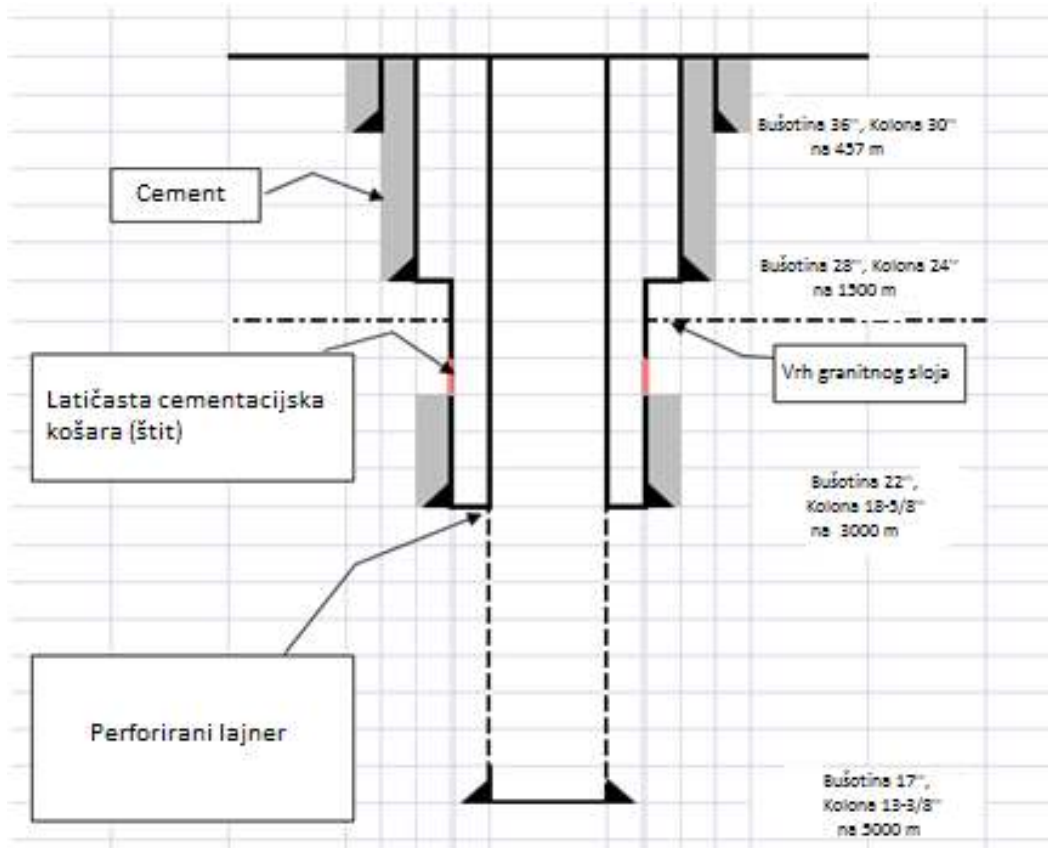
Slika 6-2. Shematski prikaz završetka bušotine (Arnold et al., 2011).

#### 6.2.4. Referentna konstrukcija i operativni redosljed

Operativni redosljed za bušenje profila bušotina prikazan je u nastavku. Ova procedura je priprema samo za bušotinu na slici 6-3., sve aktivnosti vezane za postavljanje spremnika opisane su u kasnijim poglavljima. Pitanje karotaže koje je limitirano maksimalnom veličinom bušotine ovdje nije obrađeno (Arnold et al., 2011).

1. Ugovor za pripremu mjesta i instalaciju konduktora 40" (1,0 m) do oko 30 m dubine.
2. Transport bušaćeg postrojenja na lokaciju, montaža bušaćeg postrojenja, bušenje bušotine promjera 36" (0,91 m) do dubine od oko 497 m. (Alternativa, bušenje bušotine promjera 26", 0,66 m i otvor na površini 36", 0,91 m).
3. Karotaža bušotine bez zaštitne kolone od dna konduktora do 497 m.
4. Postavljanje 497 m zaštitne kolone promjera 30" (0,76 m).
5. Cementiranje zaštitne kolone promjera 30" (0,76 m) do površine.
6. Navarivanje spojnice promjera 30" (0,76 m) na zaštitnu kolonu, instalacija i testiranje BOPE.
7. Izbušiti petu zaštitne kolone i obaviti ispitivanje tlaka loma formacije.
8. Bušenje bušotine promjera 28" (0,71 m) do dubine oko 1500 m.
9. Karotaža bušotine bez zaštitne kolone od 497 do 1500 m.
10. Postavljanje oko 1500 m zaštitne kolone promjera 28" (0,71 m).
11. Cementiranje zaštitne kolone promjera 28" (0,71 m) do površine.
12. Uklanjanje spojnice promjera 30" (0,76 m) i navarivanje spojnice promjera 28" (0,71 m) na zaštitnu kolonu, ugradnja glavnog ventila na spojnicu.
13. Instalirati BOPE na vrh glavnog ventila i instalirati
14. Izbušiti petu zaštitne kolone i obaviti ispitivanje tlaka loma formacije.
15. Bušenje bušotine promjera 22" (0,56 m) do dubine oko 3000 m.
16. Karotaža bušotine bez zaštitne kolone od 1500 do 3000 m.
17. Postaviti oko 1500 m lajnera promjera 18<sup>5/8</sup>" (0,47 m) i vješalicu na dno zaštitne kolone promjera 24" (0,61 m).
18. Zatvaranje kolčaka za višestupanjsku cementaciju, bušenje pete zaštitne kolone i vršenje ispitivanja tlaka loma formacije.
19. Bušenje bušotine promjera 17" (0,43 m) do dubine oko 5000 m.
20. Karotaža bušotine bez zaštitne kolone od 3000 do 5000 m.

21. Postavljenje 2000 m perforiranog lajnera promjera  $13^{3/8}$ " (0,34 m) i vješalice na dno zaštitne kolone promjera  $18^{5/8}$ " (0,47 m).
22. Postavljanje kratkog lajnera promjera  $13^{3/8}$ " (0,34 m) do površine.
23. Uklanjanje BOPE i puštanje bušačkog postrojenja u rad.



Slika 6-3. Konstrukcija bušotine (Arnold et al., 2011).

### 6.3. Spremnici za otpad

Spremnici za otpad konstruirani su i izrađeni postupcima koji su potrebni za osiguravanje visokog stupnja sigurnosti da radioaktivni materijali budu zadržani unutar spremnika tijekom svih faza podzemnih radova, odlaganja u duboku bušotinu i sve dok bušotina ne bude zabrtvljena. Svi podzemni radovi bit će predmet radiološkog i radno zdravstvenog standarda i sigurnosnog standarda (Arnold et al., 2011).

Tehnički zahtjevi za predloženu konstrukciju uključuju (Arnold et al., 2011):

- Konstrukcija spremnika za otpad mora osigurati visoki stupanj osiguranja, tj. da neće doći do istjecanja radioaktivnog materijala tijekom rukovanja i odlaganja

spremnika s otpadom. Zavarivanje i brtvljenje spremnika mora spriječiti oslobađanje radionuklida u krutom, tekućem i plinovitom stanju.

- Spremnik za otpad mora zadržati strukturnu cjelinu tijekom punjenja, transporta i rukovanja prije odlaganja.
- Spremnik za otpad mora zadržati strukturnu cjelinu tijekom odlaganja, brtvljenja i napuštanja bušotine. Konstrukcija spremnika za otpad mora osigurati visoki stupanj sigurnosti da spremnici mogu izdržati tlakove fluida, mehanička opterećenja, temperature tijekom odlaganja i ostalih operativnih faza.
- Spremnici za otpad moraju imati integrirani sustav za spajanje s ostalim spremnicima i s bušaćom šipkom za spuštanje u zonu odlaganja kao i u kolonu za spremnike. Spoj mora imati dovoljnu stabilnost da može izdržati mehanička opterećenja tijekom i nakon odlaganja i za potencijalno vađenje tijekom operativnih faza.
- Unutarnja dužina spremnika za otpad mora biti dovoljna da prihvati većinu netaknutih šipki s iskorištenim gorivom. Dužina spremnika mora biti najmanje 4,2 m.
- Spremnici bi trebali zadržati svoju cjelinu toliko dugo koliko se primjenjuju. Međutim, koncept odlaganja u duboke bušotine ne oslanja se na spremnike za otpad kao značajnu barijeru za istjecanje radionuklida nakon operativnih postupaka.
- Konstrukcija, rukovanje i odlaganje spremnika s otpadom mora spriječiti svaku mogućnost za nuklearnu kritičnost.

Hidrostatski tlak fluida na spremnik za otpad bit će funkcija dubine i gustoće fluida unutar bušotine. Gustoća fluida će biti funkcija temperature i saliniteta, koja se također mijenja s dubinom. Visoki salinitet slane vode očekivan je u primarnoj stijeni u dubokim dijelovima bušotine za odlaganje, ali sastav fluida unutar zacijevljene bušotine može se kontrolirati kroz sigurni obujam kroz koji se spremnici odlažu. Zahtjev konstrukcije tlaka fluida konzervativno se bazira na pretpostavljenom profilu saliniteta koji varira, od svježe vode na površini do gustoće od 1,1\*gustoća svježe vode na dubini od 500 m i variranju gustoće od 1,1\*gustoća svježe vode do gustoće 1,3\*gustoća svježe vode na dubini od 5000 m. Pretpostavljeni temperaturni gradijent je 25 °C/km. Rezultantni tlak fluida na dnu bušotine je oko 57 MPa (8250 psi) i taj tlak je korišten kao zahtjev za konstrukciju spremnika.

Nominalni zahtjev za mehaničko opterećenje za spremnike je bazirano na pretpostavci da napunjeni spremnici trebaju biti postavljeni u niz od 40 spremnika (otprilike interval od 200 m). Maksimalna tlačna sila na najdonji spremnik u nizu nakon odlaganja biti će jednaka maksimalnoj vlačnoj sili najgornjeg spremnika u nizu kada budu spušteni u bušotinu. Zahtjevi konstrukcije za mehaničko opterećenje bazirani su na preliminarnoj konstrukciji spremnika u kojoj se pretpostavlja da će svaki spremnik biti napunjen s 421 šipkom istrošenog goriva težine od 2,39 kg/gorivom članku. Aproksimacija apsolutne težine spremnika i otpada za 40 spremnika je 69,400 kg. Na kraju konstrukcija spremnika sadrži manje gorivih šipki nego je upotrebjeno u pretpostavci danoj iznad, tako da će stvarna težina niz spremnika biti manja nego ova. Potisak fluida unutar bušotine je konzervativno degradiran u zahtjevima konstrukcije. Sile udružene s potencijalnim povećanjem spremnika kroz operativne faze moraju biti uzeti u obzir kao relativne sigurnosne margine za ovaj zahtjev konstrukcije.

Dva tipa spremnika za otpad konstruirana su za varijacije u stvaranju topline od otpada i dubine odlaganja. Stabilnost čelika mogla bi biti značajno smanjena unutar povećanja temperature od strane iskušanih različitih spremnika. Maksimalna vrijednost temperature za zahtjev konstrukcije je grubo bazirana na vrhunac simulirane temperature za odlagališta potrošenog nuklearnog goriva i vitrificiranog visoko radioaktivnog otpada iz prerade (Brady, 2009). Spremnici za niže temperature s tanjim stijenkama konstruirani su za maksimalne temperature do 160°C. Spremnici za visoke temperature s debljim stijenkama konstruirani su za maksimalne temperature do 300°C.

### **6.3.1. Punjenje spremnika s otpadom**

Sustav odlaganja predloženim dizajnom bazira se na razdvajanju iskorištenih nuklearnih gorivih članaka na mjestu reaktora i punjenja zasebnih gorivih šipki u spremnike za otpad. Iako ovaj proces zahtjeva veće troškove i napore u punjenju spremnika, on omogućuje manji promjer spremnika za otpad, manji promjer bušotine i veću operativnu sigurnost za konstrukciju bušotine u zahtijevanim dubinama. Veća gustoća iskorištenog goriva u spremnicima za otpad također rezultira manjim brojem spremnika, manjim brojem bušotina i kraćim transportom, bušenjem i manjim operativnim troškovima. Tehnologija konsolidacije goriva i troškovi analizirani su u prijašnjim studijama i sažete su u Gibbs (2010). Rezultati tih studija pokazuju da je rastvaranje



asemblija i konsolidacija gorivih šipki tehnički izvedivo, financijski prihvatljivo i troškovi konsolidacije će se neutralizirati zbog odlaganja u manjem broju spremnika i bušenja manjeg broja bušotina. Zasebne gorive šipke mogu biti izvađene iz većine gorivih asemblija iz nuklearnog reaktora i mnogo reaktora ima unutarnje skladište koje može biti uređeno za razdvajanje gorivih asemblija u skladišnim bazenima. Dodatna reaktorska skladišta bi bila neophodna za brtvljenje, zaštitu, varenje i rukovanje napunjenim spremnicima za otpad. Međutim, tehnika za takva skladišta trebala bi biti jednostavna, s obzirom na veličinu spremnika.

Punjenje cilindričnih gorivih šipki u spremnike za otpad je bazirano na šesterokutnim zatvorenim spremnicima šipki koji imaju pretpostavljen promjer od 1 cm (DOE, 1997). Spremnici konstruirani za niže temperature mogu sadržavati oko 367 gorivih šipki i manjeg su unutarnjeg promjera, spremnici za više temperature mogu sadržavati 349 gorivih šipki. Za usporedbu, standardni 17\*17 gorivi asembliji iz nuklearnog reaktora sadržavaju 268 gorivih šipki, tako da konsolidacijom gorivih šipki spremnici za niše temperature čine povećanje od 37% u kapacitetu odlagališta, uspoređeno s odlaganjem cijelih gorivih asemblija. Gušće pakiranje iskorištenih gorivih šipki u preporučene konstruirane spremnike za otpad u rezultatima izvješća procijenjeno je da za odlaganje svog nuklearnog otpada iz svih reaktora u SAD-u potrebno oko 700 bušotina. Procijenjen broj potrebnih bušotina za čitave gorive asemblije procjenjuje se na 950 (Brady, 2009).

Spremnici za otpad također su konstruirani za odlaganje vitrificiranog zaštitnog visoko radioaktivnog otpada ili vitrificiranog otpada iz prerade ili komercijalne upotrebe nuklearnog goriva. Vitificirani visoko radioaktivni otpad može biti uliven kao rastaljeno staklo u čelični spremnik s tankom stijenkom, koji tada može biti smješten u spremnik za otpad. Treba napomenuti da taj postojeći visoko radioaktivni otpad u formi stakla neće moći stati u referentnu konstrukciju spremnika za otpad.

### **6.3.2. Testiranje spremnika za otpad**

Testiranje spremnika prije punjenja otpadom provjerit će dimenzije spremnika i jačinu propuštanja materijala korištenih u izradi spremnika. Debljina stijenke spremnika mjerit će se kako bi se provjerila proizvodna tolerancija od  $\pm 6\%$ . Postojanost navoja na spojnica biti će pregledane i verificirane. Jačina propuštanja čelične stijenke spremnika i spojevi biti će testirani na povišenim temperaturama kako bi se provjerilo da li su zahtjevi

konstrukcije ispunjeni. Varovi brtvenih čepova na spremniku biti će provjereni slikanjem rendgenskim zrakama nakon punjenja otpada. Uzorci s površine napunjenih spremnika testirat će se na bilo kakve radiološke kontaminacije. Test ispuštanja lažnog napunjenog spremnika za otpad provesti će demonstraciju sposobnosti izdržljivosti spremnika na moguće nesreće pri rukovanju ili odlaganju. Spremnik napunjen s otpadom ne bi trebao propuštati nakon potencijalnog pada tijekom podizanja transportne posude u vertikalni položaj prije tračnog transporta u bušotinu. Niti bi spremnik trebao propuštati ako udari o dno bušotine pri velikoj brzini nakon slučajnog otpuštanja kolone za spremnike u bušotinski fluid (Arnold et al., 2011).

### **6.3.3. Konstrukcija i rukovanje spremnikom za otpad**

Spremnici za otpad konstruirani su da budu relativno jednostavni i da koriste materijale i komponente dostupne u naftnoj i geotermalnoj industriji, te mogu izdržati hidrostatski tlak bez unutarnje mehaničke potpore. Debljina stijenki spremnika koja može izdržati maksimalni hidrostatski tlak od 57 MPa je izračunata bazirajući se na 5CT specifikacijama Američkog naftnog instituta za K55 bešavne cijevi i sigurnosni faktor 1,2. Standardna proizvodna tolerancija za debljinu stijenke čelične cijevi je  $\pm 12,5\%$  i snaga gnječenja za najmanju debljinu stijenke se izračunava unutar ove tolerancije. Veći stupanj sigurnosti postojanosti spremnika za otpad može se postići proizvodnjom s višom tolerancijom nego što propisuje Američki naftni institut. Spremnici za otpad sa višom tolerancijom za debljinu stijenke također pomažu osigurati da se maksimalan broj gorivih šipki može pakirati u svaki spremnik.

Smanjenje čvrstoće s povećanjem temperature je procijenjena iz različitih izvora. *ASME* preporuča konstrukciju faktorima snage iz propisa za kotlove i posude pod tlakom za karbonske i niskolegirane čelike na 300° pokazuju faktor snage od 0,78. Razni proizvođači pružaju procjene tog faktora konstrukcije. Teneris je izvijestio da prosječan broj za korištenje od 0,86 za njihovih 380 MPa smanjuje čvrstoću zaštitne kolone. Grant Pridco izvještava 0,74 i Hunting 0,82 za njihovih 550 MPa smanjuje čvrstoću zaštitne kolone. Spremnici manje debljine stijenke su bazirani na zadržavanju prinosu faktora snage od 0,82 na 300°C i 0,90 na 160°C. Proizvođačima može biti potrebno pokretanje testova razvlačenja s promjenom temperature kao kriterij prihvatljivosti materijala koji se koristi za spremnike.

Spojevi između spremnika sastoje se od veze spojenih navoja vanjskog promjera od 11,75 inča (0,30 m) i 5 navoja po inču. Prilagođena konstrukcija za te spojeve s debljinom stijenke od 1,21 inča (3,07 cm) će biti potrebna kako bi odgovarala cijevi korištenoj u konstrukciji spremnika za niže temperature. Podaci o postojećim spojevima sa manjom debljinom stijenke izrađene od čelika L80 ima minimalnu čvrstoću razvlačenja spoja od 550 MPa.

Spremnicima će čepovi biti zavareni ispod i iznad otpada. Donji čep može biti zavaren prije nego gorive šipke budu stavljene u spremnik, a vijčani spoj će biti urezan u spremnik. Gornji čep bi trebao biti robotski zavaren na mjestu odlaganja nakon što otpad bude napunjen u spremnike. Ako se gornji čep zavari prije nego što se vijčani spoj urezao u čep, onda se urezivanje mora provesti robotizirano u zaštićenom okruženju, a ako je gornji navoj urezan prije punjenja spremnika otpadom i zavarivanja gornjeg čepa, tada var treba biti dovoljno daleko od navoja kako nebi došlo do deformacije navoja.

Predloženo konstruirani spremnici će lako izdržati mehanička tlačna i vlačna opterećenja koja stvaraju spremnici koji leže na njima i opterećenja od težine kolone spremnika tijekom odlaganja. S normalnom debljinom stijenke od 1,21 inč (3,07 cm) stijenke imaju površinu od 36,265 kvadratnih inča (234 kvadratnih cm). Rezultantni gornji ili donji pritisak zbog težine kolone spremnika od 200 m je 69,400 kg što je oko 29,1 MPa. Taj mehanički pritisak je mnogo manji od degradacije čelika toplinskim rastezanjem od 380 MPa, što rezultira faktorom sigurnosti većim od 10 za ta mehanička opterećenja.

Mehanički robusni karakter konstrukcije spremnika trebao bi spriječiti potrebu za specijalnim procedurama rukovanja tijekom punjenja, transporta i pripreme za odlaganje na mjestu bušotine. Šipke iskorištenog goriva stavljene u spremnike za otpad trebale bi biti u skladišnom bazenu na mjestu gdje se nalazi i reaktor ili u centralnom skladištu postrojenja. Vitrificirani visoko radioaktivni otpad trebao bi biti spremljen u spremnike u postrojenju za preradu u centralno skladište tog postrojenja. Sva rukovanja sa spremnicima za otpad nakon punjenja spremnika otpadom biti će provođena u zaštićenom okruženju. Transport spremnika napunjenih otpadom biti će u zatvorenom zaštitnom spremniku koji treba zaštititi spremnik od prometnih nesreća.

Nuklearna kritičnost biti će analizirana i izbjegavana tijekom svih faza odlaganja u duboke bušotine koristeći standardne industrijske analitičke metode i praksu. Analiziranje kritičnog rizika za iskorišteno gorivo u Yucca Mountain-u predlaže da je rizik od kritičnosti unutar napunjenih spremnika u bušotini neznatan za odlaganje gorivih šipki slabo obogaćenog urana za komercijalne nuklearne reaktore. Rizik kritičnosti prati korozija

i kvar spremnika za otpad, u kojem se geometrija gorivih članaka može nepredvidivo promijeniti što je vrlo nesigurno. Sada, maksimalni polumjer asemblia uranovog goriva i njegova povezanost s rizikom kritičnosti biti će limitirana polumjerom bušotine u zoni odlaganja, smanjujući vjerojatnost za kritičan događaj. Međutim, trajanje potencijalne nuklearne kritičnosti u dubokim bušotinama može biti značajno povećano nego one analizirane u Sanchez (1998) s obzirom na veći pritisak tekućine i zadržavanje tekuće vode koja djeluje kao neutronske moderator na višim temperaturama.

## **6.4. Odlaganje otpada**

Tehnički zahtjevi za odlaganje otpada uključuju (Arnold et al., 2011):

- Procedure odlaganja otpada moraju osigurati visoki stupanj sigurnosti da će izloženost radnika radijaciji biti prihvatljivo niska.
- Procedure odlaganja otpada moraju osigurati visoki stupanj sigurnosti da neće doći do istjecanja radioaktivnog materijala tijekom rada.
- Procedure odlaganja otpada moraju osigurati visoki stupanj sigurnosti da spremnici za otpad neće zapeti iznad zone odlaganja u bušotini.

### **6.4.1. Rukovanje na površini i zaštita**

Napunjeni spremnici za otpad biti će transportirani do mjesta izbušene duboke bušotine traktorskom prikolicom koristeći transportni spremnik sličan postojećem za dopremanje iskorištenog nuklearnog goriva. Takvi spremnici osiguravaju zaštitu radnicima i građanima tokom transporta i štite gorivo u slučaju nesreća. Primjeri postojećih transportnih spremnika za prijevoz na komercijalnim kamionima koji mogu smjestiti preporučene konstruirane spremnike su modeli LI-1/2 and NAC-1/NFS-4, sa unutarnjim promjerom od 13,375 i 13,5 inča (0,340 i 0,343 m) (Saling i Fentiman, 2001). Sigurnost tih modela spremnika treba biti unaprijeđena za nešto veće težine i radioaktivni sadržaj punih spremnika za otpad, odnosno za pojedinačne gorive asemblije iz nuklearnih reaktora za koje su ti transportni spremnici i napravljeni. Odjednom u tom spremniku može biti transportiran samo jedan spremnik za otpad. Ovaj model spremnika može se preinačiti i rekonstruirati da dozvoljava rotaciju u vertikalni položaj, postavi iznad bušotine i poveže

spremnik za otpad s izbušenom kolonu za odlaganje u bušotinu. Napunjen spremnik za otpad ostaje u zaštićenoj konfiguraciji od točke gdje se postavlja u zaštitni spremnik do trenutka kada se spušta u bušotinu.

Rukovanje punim spremnicima za otpad na mjestu bušotine biti će provedeno u maniri sličnoj opisano u Woodward i Clyde Consultants (1983). Woodwardov i Clydeov sustav zahtjeva rotaciju transportnog spremnika u vertikalnu poziciju iz traktorske prikolice usporedno s postrojenjem za odlaganje na transportne tračnice. Spremnik koji sadrži napunjen spremnik za otpad će tada biti pomican duž kratkog sustava tračnica unutar zatvorenog prostora ispod podignute platforme bušaćeg postrojenja.

Oprema na daljinsko upravljanje otvoriti će gornji poklopac transportnog spremnika, cijev za bušenje biti će spojena na vrh spremnika, spremnik će se podignuti zatim će se otvoriti donji poklopac transportnog spremnika te će se spremnik spustiti u zaštićen prostor ispod tračnog transportera i povezat će se sa spremnikom za otpad ispod sebe koji je zaključan u bušotinskom prstenu u podzemlju. Donji spremnik se otključava i spušta se u koloni za jednu duljinu spremnika, a novi spremnik se zaključava u bušotinskom prstenu. Cijev za bušenje se odšarafkuje s vrha spremnika, podiže iznad bušaće platforme, prazan transportni spremnik miče se iz kolone i proces se ponavlja za sljedeće spremnik za otpad. Sve operacije na nezaštićenim mjestima će se obavljati na daljinu i pratiti putem video veze.

Woodwardov i Clydeov sustav za rukovanje otpadom zahtjeva korištenje standardne bušaće garniture za bušenje i izradu bušotine, i posebnu specijalno dizajnirano postrojenje za odlaganje spremnika za otpad, koje izvodi i čepljenje i brtvljenje bušotine. Ova strategija ima prednost što može osloboditi bušaće postrojenje za bušenje i izraditi sljedeću bušotinu na istom mjestu, dok se otpad simultano odlaze u postrojenju za odlaganje. Nedostatak je što zahtjeva velika kapitalna ulaganja za specijalno, odano postrojenje za odlaganje koje vjerojatno smanjuje puni kapacitet i sposobnost bušaćeg postrojenja. Bušaće postrojenje za duboke bušotine vjerojatno će biti bolje opremljeno da se nosi s neplaniranim događajima, kao što je opterećenje kolone spremnika za otpad. Alternativno, možda bi bilo efikasnije modificirati postojeće bušaće postrojenje da buši, odlaže otpad i obavlja brtvljenje i zatvaranje bušotine. Potpuna ocjena ove alternative je u kasnijem poglavlju ove studije, ali referentna konstrukcija i operacije ovdje opisane za korištenje pojedinačno, modificirano bušaće postrojenje za bušenje i odlaganje (Arnold et al., 2011).

#### **6.4.2. Odlaganje spremnika za otpad**

Spremnici za otpad biti će odlagani u zonu odlaganja u bušotinu u koloni od 40 spremnika, ukupne duljine 192 m. Svaki spremnik u nizu biti će spušten u zonu odlaganja i ostatak će na dnu bušotine u slučaju ako je prvi u nizu ili na mosnom cementnom čepu ili cementu utisnutom iznad već spuštenog niza spremnika za otpad za sljedeći spremnik u nizu. Cementni mosni čep i cement stavlja se iznad spremnika prije odlaganja sljedećeg spremnika za otpad. Cementni mosni čep biti će postavljen na nekoj udaljenosti iznad vrha najgornjeg spremnika u koloni kako bi se dozvolilo temperaturno širenje kolone čeličnih spremnika uzrokovano vrućinom generiranom iz otpada. Koristi se vrijednost od  $13 \cdot 10^{-6}$  po °K za koeficijent linearnog temperaturnog širenja karbon/ugljik čelika, odnosno 200 m duga kolona spremnika produljit će se za 0,08 m i 0,44 m za porast u temperaturi od 30°C i 170°C. Diferencijalno temperaturno širenje kolone spremnika za otpad u odnosu na primarnu granitnu stijenu biti će manja od tih vrijednosti zbog odgovarajućeg širenja granita blizu bušotine.

Jedno važno pitanje je maksimalna temperatura za komercijalno dostupne cementne čepove i temperaturna povećanja od radioaktivnog otpada. Nekoliko standardnih konstrukcija za cementne čepove koji će stati u zaštitnu kolonu  $13^{3/8}$  inča (0,34 m) u zoni odlaganja otpada su predviđeni za povećanje do 400 °F (204 °C). Spremnici koji sadržavaju vitrificirani visoko radioaktivni otpad koji ima visoko toplinsko isijavanje mogu prekoračiti maksimalni temperaturni rang za cementne čepove. Ovaj problem će se riješiti strategijom da se takvi spremnici postavljaju u sredinu niza spremnika, te će to povećati udaljenost između toplijih spremnika i cementnih čepova, štiteći ih od prelaska njihovog maksimalnog temperaturnog ranga (Arnold et al., 2011).

#### **6.4.3. Cementiranje spremnika i cementni čepovi**

Bentonit na bazi sintetskih ulja koristit će se u zoni odlaganja tijekom odlaganja spremnika za otpad. Iako spremnici neće biti zacementirani u mjestu, velika količina bentonita u obliku mulja kroz vrijeme će osigurati izvjestan stupanj cementacije oko spremnika. Odlagališni mulj također će osigurati podmazivanje za sigurnije odlaganje na željenu dubinu i lakše vađenje spremnika ako to bude potrebno.

Svaki spremnik za otpad u nizu biti će odvojen mostnim cementnim čepom i nalježućim cementnim čepom. Primarna funkcija mostnog cementnog čepa je osigurati osnovu na koju se može postaviti deblji cementni čep. Mosni cementni čep i cementni čep zajedno moraju izdržati težinu nalježućeg niza spremnika. Cementni čep treba također upasti u prstenasti prostor između perforiranog lajnera zaštitne kolone i stijenke bušotine i osigurati barijeru za migraciju fluida kroz prstenasti prostor između intervala niza spremnika za otpad. Zbog ne kompatibilnosti mulja na bazi ulja i cementa, sav mulj u bušotini iznad mostnog cementnog čepa biti će ispran prije postavljanja cementnog čepa.

Preporuke za vezivanje napravljene su na bazi tlačne sile garniture cemenata i na pretpostavci da taj materijal zadovoljava zahtjeve čvrstoće i da će također osigurati adekvatnu vezu. U bušotini, posmična veza se tipično koristi za dokazivanje težine cijevi koju cement može izdržati. Sila posmične veze podijeljena na kontaktu cementa i zaštitne kolone povećava naprezanja posmične veze.

Tipična jačina cementa klase H na dubini od 15,000 ft (4570 m) uzima se da je 27,5 MPa za predviđene temperature i tlakove (Smith, 1989). Korištenjem unutarnjeg promjera zaštitne kolone od 12,459 inča (0,316 m) nalježuće kolone spremnika težine od 153,000 lbs (69,400 kg), potrebna je duljina cementnog čepa od oko 3,2 ft (0,98 m). Svojstva veze cementa i zaštitne kolone uvelike ovisi o izvedbi cementiranja, starosti zaštitne kolone, zacjevljenju zaštitne kolone na površini, vremenu potrebnom da se cement stvrdne, tipu fluida u bušotini između ostalih mogućih faktora. Uzimanjem tih nepoznatih faktora u obzir i željom da se ubaci i formira barijera u prstenastom prostoru između zaštitne kolone i stijenke bušotine, preporuča se cementni čep od 10 m.

Mnogi tipovi mosnih cementnih čepova su komercijalno dostupni za korištenje u procedurama odlaganja otpada. Oba dizajna, mehanički i bubrivi su dostupna. Neki bubrivi, paker-mosni čepovi mogu biti punjeni s cementom za trajno postavljanje. Dva primjera mosnih cementnih čepova su: 1) Weatherford PBP mosni cementni čep i 2) TechTool visokotlačni cementni čep. Oba su konstruirana za temperaturni rang do 400°F (204°C) i za veličinu zaštitne kolone od 13<sup>3/8</sup>" (0,34 m) (Arnold et al., 2011).

#### **6.4.4. Sigurnost i monitoring**

Operativna sigurnost odlaganja otpada osigurat će se kroz rutinsko praćenje i planiranje mogućih neočekivanih uvjeta ili događaja. Radiološko praćenje uključivati će

označavanje svih radnika i posjetitelja na mjestu i tijekom transporta spremnika za otpad. Oprema će biti rutinski uzorkovana i praćena na radioaktivnu kontaminaciju koristeći standardne radijacijske sigurnosne procedure. Praćenje razine zračenja u realnom vremenu na području rada postrojenja za bušenje biti će provedeno tokom operacija odlaganja otpada, te povezano na alarmni sustav. Razina radijacije u fluidima koji cirkuliraju u bušotini biti će konstantno praćena i periodično uzorkovana za analizu koncentracije radionuklida.

Jedan neplanirani zabrinjavajući scenarij bio bi da kolona spremnika zaglavi na dubini nižoj od zone odlaganja. Niz provedenih mjera referentne konstrukcije i operacija čini taj scenarij skoro nemogućim. Bušotina će tijekom procesa odlaganja biti potpuno zacijevljenjena, od površine do dna. Zaštitna kolona biti će pregledana koristeći kavnomjer prije odlaganja otpada kako bi se otkrile devijacije u unutarnjem promjeru, savijanje, uvijanje ili neka druga smetnja koja može uzrokovati da kolona spremnika zaglavi. Peta vodilica sa zaobljenim vrhom biti će postavljena na prvi spremnik u koloni. Testiranje formacije prije odlaganja otpada osigurat će informacije u pogledu potencijalnog odlomljavanja stijene tijekom operacija potencijalno kompromitirajućih za zaštitnu kolonu. Dodatno osiguranje može biti postignuto jednokratnim kavnomjerom koji će biti postavljen ispod najnižeg spremnika u koloni. Ovaj alat će poslati trenutna mjerenja unutarnjih dimenzija zaštitne kolone, operatorima preko telemetrije. Spuštanje bušaće kolone zaustavit će se ako naiđe na potencijalno začepljenje ispred kolone spremnika za otpad, osiguravajući ga od zaglavlivanja. Ako se kolona spremnika zaglavi u bušotini, znatna sila može se primijeniti od strane bušaćeg postrojenja da gurne, povuče ili zarotira kolonu spremnika, bazirane na čvrstoći spremnika za otpad i povezanosti između njih. Ako se kolona spremnika ne može odglaviti, tada se mosni cementni čep i cementni čep mogu postaviti iznad kolone spremnika. Odlaganje otpada se može nastaviti ako je zaglavljena kolona spremnika unutar zone odlaganja. Bušotina će se zacementirati, zabrtviti i napustiti, ako je kolona spremnika zaglavljena iznad zone odlaganja i ne može se izvaditi. Ostale metode vađenja možda bi bile moguće za vađenje kolone spremnika ako bi bila zaglavljena na maloj dubini.

Drugi potencijalni scenarij nesreće je prijevremeno otpuštanje spremnika tokom odlaganja, u kojem bi niz spremnika pao ili se zabio u dno bušotine. Spremnik može biti probijen pri udaru o dno bušotine ako brzina pada niz spremnika bude dovoljno velika. U budućnosti, moguća konstrukcija za sprječavanje ispadanja niza spremnika ako klinovi u prstenu bušotine oslabe, postavi se automatsko aktiviranje čeljusti koje će uhvatiti



spremnike, kako je predloženo od Woodward and Clyde Consultants (1983). Nadalje, konačna brzina niza spremnika za otpad potapanjem u fluid kroz zacijevljenu bušotinu bila bi limitirana od viskoznih sila fluida koji struje pored spremnika za otpad. Ova konačna brzina je povezana s prstenastim prostorom između unutarnjeg promjera lajnera (12.459 inča, 0,316 m) i vanjskog promjera veze na spremniku za otpad (11.984 inča, 0,304 m) pomoću jednadžbe dane od Bates (2011). Uz pretpostavku da je efektivni vanjski promjer spremnika jednak promjeru tijela spremnika (10,75 inča, 0,273 m), konačna brzina tonućeg niza spremnika biti će oko 4m/s. Vrlo je vjerojatno da spremnici neće biti probušeni pri udaru o dno bušotine pri ovoj relativno maloj brzini.

Otkrivanje prekomjerne radijacije u bušotinskom fluidu iz bilo kojeg scenarija nesreća gore opisanog, zbog greške na spremniku za otpad ili zbog nekog nepoznatog razloga, izazvat će trenutnu obustavu odlaganja otpada. Osim toga, skladište za kontaminirane fluide će biti dio postrojenja i provodit će se akcije za sigurno skladištenje kontaminiranih fluida proizvedenih na površini.

#### **6.4.5. Referentna konstrukcija i operativni slijed**

Referentna konstrukcija i operativni slijed odlaganja spremnika za otpad uključuje; istovar transportnih spremnika s traktorske prikolice, pozicioniranje spremnika iznad bušotine, postavljanje spremnika za otpad u niz spremnika, spuštanje niza spremnika u zonu odlaganja i postavljanje mosnih cementnih čepova i cementa. Spremnici za otpad biti će zamijenjeni s 10 kolona spremnika koje se sastoje od 40 spremnika po koloni. Svaki niz spremnika biti će odvojen mosnim cementnim čepom i cementnim čepom koji će podnositi težinu niza spremnika i izolirati zasebne nizove spremnika. Dodatni cementni mosni čep i cementni čep biti će postavljen iznad zadnjeg niza spremnika.

Opći operativni slijed za rukovanje spremnicima za otpad i odlaganje(Arnold et al., 2011):

1. Pozicioniranje traktorske prikolice za istovar transportnog spremnika.
2. Podizanje punog transportnog spremnika u vertikalni položaj na žljenički sustav transporta.
3. Prijevoz transportnog spremnika tračnicama do zaštićene sobe ispod podignute platforme bušaćeg postrojenja.
4. Pozicioniranje transportnog spremnika iznad bušotine
5. Zatvaranje vrata zaštitne sobe.

6. Otvaranje vrata zaštitne sobe iznad bušotine.
7. Daljinsko otvaranje gornjeg zatvarača transportnog spremnika.
8. Daljinsko spajanje bušaće cijevi na "Tenaris Blue" priključak na gornjem kraju spremnika za otpad.
9. Podizanje spremnika za otpad s bušaćom kolonom kako bi preuzeo težinu donjeg zatvarača transportnog spremnika.
10. Daljinsko otvaranje donjeg zatvarača transportnog spremnika.
11. Spuštanje spremnika za otpad i povezivanje s spremnikom ispod sebe koji je zaključan klinovima u bušotini.
12. Spuštanje niza spremnika, otključavanje klinova u bušotini i spuštanje niza spremnika za dužinu novo dodanog spremnika.
13. Zaključavanje najvišeg spremnika klinovima.
14. Zatvaranje zaštitnih vrata iznad bušotine.
15. Otvaranje vrata zaštitne sobe, pomicanje platforme s tračnicama do traktorske prikolice i spuštanje praznog transportnog spremnika na prikolicu.
16. Ponavljanje koraka od 1 do 15 za svaki spremnik dok svih 40 nizova spremnika ne budu postavljeni u bušotinu.
17. Spuštanje niza spremnika za otpad do dna bušotine ili vrha cementnog čepa postavljenog iznad prethodnih nizova spremnika.
18. Otpuštanje niza spremnika i izlazak iz bušotine.
19. Spuštanje i postavljanje mosnog cementnog čepa sa sajlama i micanje sajli iz bušotine.
20. Spuštanje nazad u bušotinu sa bušaćom kolonom i postavljanje cementnog čepa iznad mosnog čepa.
21. Raspoređivanje bentonita na bazi ulja u nižih 200 m bušotine za pripremanje odlaganja idućeg niza spremnika za otpad.
22. Vađenje iz bušotine
23. Ponavljanje gornjeg slijeda dok 10 nizova spremnika ne bude postavljeno u zonu odlaganja u bušotini.

Nakon što je postavljen i zadnji niz spremnika uključujući i mosni cementni i cementni čep:

1. Uklanjanje vodeće kolone promjera  $13^{3/8}$ " (0,34 m) iz bušotine.

2. Ulazak u bušotinu s rezačem kolone i rezanje kolone promjera  $13^{3/8}$ " (0,34 m) iznad cementa.
3. Izvlačenje odrezanog dijela iz bušotine s rezačem.
4. Ulazak u bušotinu s hvatačem i hvatanje zaštitne kolone promjera  $13^{3/8}$ " (0,34 m). Povlačenje zaštitne kolone van bušotine.
5. Postavljanje cementnog čepa na vrh cementirane sekcije zaštitne kolone 18-5/8" (0,47 m).
6. Ulazak u bušotinu s rezačem kolone i rezanje kolone promjera  $18^{5/8}$ " (0,47 m) iznad cementa.
7. Izvlačenje odrezanog dijela iz bušotine s rezačem.
8. Ulazak u bušotinu s hvatačem i hvatanje zaštitne kolone promjera  $18^{5/8}$ " (0,47 m). Povlačenje zaštitne kolone van bušotine.
9. Punjenje alata za utiskivanje bentonita, postavljanje alata u bušotinu i postavljanje prvog bentonitnog čepa na vrh cementa, vađenje alata iz bušotine.
10. Ponavlja se sve dok bentonitno punjenje ne dosegne unutrašnjost zaštitne kolone promjera 24" (0,61 m) na 1500 m.

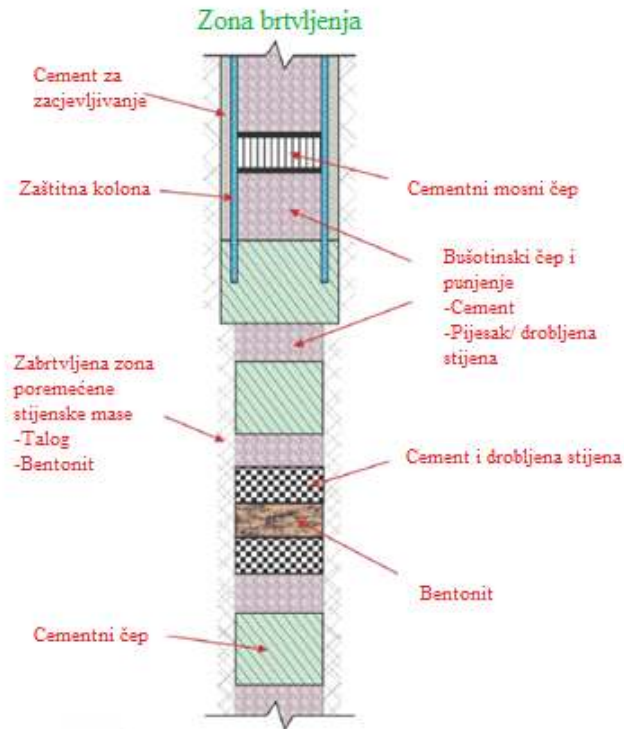
## 6.5. Brtvljenje i napuštanje bušotine

Tehnički zahtjevi predložene konstrukcije uključuju (Arnold et al., 2011):

- Brtveni sloj u bušotini mora osigurati slabopropusnu barijeru za tok fluida unutar bušotine. Ukupna propusnost materijala korištenog u brtvenom sloju iznad otpada mora biti manji od  $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  (Herrick et al., 2011). Međutim, zahtjevana ukupna propusnost u referentnoj konstrukciji manji je od  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ .
- Brtveni sloj u bušotini mora formirati slabopropusnu vezu sa stijenkom bušotine kako bi se spriječio tok fluida oko brtvenog sloja. Neki materijali za brtvljenje, kao zbijeni bentonit, trebali bi smanjiti propusnost primarne stijene ispod bušotine blizu pukotina. (Lokacije s visokom gustoćom pukotina biti će eliminirane u fazi karakterizacije lokacije)
- Brtveni sloj u bušotini mora biti trajan, posebno tijekom vrhunca toplinskog perioda (< 2000 godina), kada je vjerojatnost za tok fluida najviša.

- Brtveni sloj mora imati čvrstoću na povećana mehanička opterećenja od naliježućeg materijala, tlak bubrenja od bentonitnih materijala za brtvljenje i mogućih prevelikih tlakova odozdo.
- Brtveni sloj u bušotini mora biti kemijski stabilan na 100-200°C najmanje 2000 godina, dok ne prođe vrijeme koje je potrebno za termalni impuls i transmisivnu silu za vertikalno kretanje fluida.
- Neki materijali koji se koriste u brtvenom sloju trebaju imati mogućnost promjene sa spojevima koji će služiti kao usporivači transporta neapsorbirajućih radionuklida.
- Više brtvenih slojeva i materijala za brtvljenje koristit će se za osiguravanje prekomjerne zaštite u dubini, tako održavajući svojstva čak i nakon puknuća jednog brtvenog sloja.

Slika 6-4. prikazuje osnovne dijelove brtvenog sloja bušotine koji su opisani u daljnjem tekstu. U najnižem dijelu brtvenog sloja, komponente odgovaraju onima koje će biti postavljene nezacijevljenu bušotinu iznad kolčaka za višestupanjsku cementaciju u srednjem lajneru, koji se reže i vadi tijekom brtvljenja. Slika 6-4, također pokazuje komponente postavljene u gornji dio brtvenog sloja u tehničkoj zaštitnoj koloni. Većina bušotine biti će ispunjena cementom ili cementom sa pijeskom i sitno drobljenom stijenom koja će služiti kao oba čepa ili materijal za zatrpavanje. U donjem dijelu, razvijeni dijelovi brtvenog sloja će djelovati direktno protiv površinske stijene nakon micanja tehničke zaštitne kolone iznad kolčka višestupanjske cementacije. U sigurnim mjestima, dva cementna čepa će podupirati bentonitni ili bentonitno pješčani brtveni sloj. Silikatni pijesak ili izmrvljena stijena postavlja se između cementa i bentonita kako bi se smanjilo kemijsko međudjelovanje. U gornjim dijelovima zaštitne kolone, cementni mosni čep biti će postavljen da formira tip čepa Američkog naftnog instituta ili da odjeli cementni čep od zatrpanog dijela. Donji dio zaštitne kolone 24 inča (0,61 m) biti će podupiran cementnim brtvenim slojem (Arnold et al., 2011).



Slika 6-4. Osnovni dijelovi brtvenog sloja bušotine (Arnold et al, 2011).

### 6.5.1. Zbijeni bentonitni brtveni sloj

Bentonitne ili druge montmorinolitne bubreive gline postavljene u suhom stanju trebaju nabubriti kada se voda podigne iz zone slabe propusnosti i potpuno popuniti praznine i vršiti pritisak na okolnu stijenu. Zbog velike površine zrna i visoke promjene kapaciteta kationa, bentonit apsorbira puno kationskih radionuklida, također kemijski stvoreni bentoniti mogu apsorbirati i anionske radionuklide.

Bentonit može biti utisnut u male dubine koristeći cementacijsku pumpu ili se koristi cijev za ubacivanje bentonitnih peleta u vodu. Bentonitni čepovi za velike dubine moraju biti postavljeni istiskivanjem iz spremnika koji su ugurani na željenu dubinu ili utisnuti kroz perforiranu cijev koja sadrži bentonit (Arnold et al., 2011).

### 6.5.2. Cementni brtveni sloj

Cementi imaju nisku propusnost, mogu prodrijeti u male pukotine, mogu biti vrlo izdržljivi i metode utiskivanja cementa u bušotinu su vrlo poznate (Pusch 2008, API, 2000). Tok fluida može zaobići cementni brtveni sloj jedino kroz prostor na dodiru cementa i okolne stijene (Stormont i Finley, 1996), ili kroz oštećenu stijenu oko bušotine. Cementni dodaci se koriste za: poboljšanje vremena postavljanja mješavine, promjenu viskoziteta svježe cementne smjese i promjenu svojstva kod stvrdnjavanja cementa, posebno skupljanje. Tipična vrijednost propusnosti portland cementa, omjera voda/cement 0.4 i perioda stvrdnjavanja od 2 tjedna je  $10^{-20} \text{ m}^2$  (Neville, 1995; Onofrei et al., 1992; Smith, 1989). Skupljanje, pucanje ili kemijska promjena može povećati tu vrijednost. Vrijednosti veličine na terenu mogu biti dva ili tri puta veći (Greer i Crouthamel, 1996; SKB, 1987).

Dugovječnost cementnog brtvenog sloja se temelji na konkretnoj analizi dugovječnosti koju obavlja "*Waste Isolation Pilot Plant*" (Thompson et al., 1996). U toj analizi, izdržljivost cementnog čepa u bušotini se analizira prema odnosu broja volumena pora koje mogu proći kroz cementnu masu. Njihova analiza pokazuje da 100 pornih volumena tekućine mora proći kroz beton prije nego što se kemijski dokaže da je matriks napadnut. Thompson (1996) razmatra ovaj konzervativan pristup zato što je kritični volumen protoka potrebno prije očekivanog početka sloma kalcij silikat hidratnog (KSH) matriksa. Slom čepa će se dogoditi kada dovoljan volumen vode prođe kroz betonsku masu da KSH matriks pretrpi mjerljivu promjenu. U ovom trenutku, pretpostavljeno je da je matriks značajno degradiran i da je čep podložan slobodnim mikropukotinama i fizičkom slomu. Vrijeme potrebno da ovaj volumen prođe kroz betonsku masu može se izračunati koristeći Darcy-ev zakon, karakteristike čepa i specifične uvjete na lokaciji. Za normalne vrijednosti fizičkih karakteristika (uključujući propusnost od  $10^{-16} \text{ m}^2$ ) od 100 m čepa u zabrtvljenoj bušotini, vijek čepa prema njihovoj analizi određen je na 200 000 godina (ovaj broj ovisi o razlikama tlakova kroz čep)

Cementni materijali su osnovno sredstvo za brtvljenje bušotina u naftnoj industriji. Prema Američkom naftnom institutu klase cementa A, B i C se koriste od površine do 1.8 km, klase G i H se koriste do 2,4 km, klasa D od 1,8 do 3,1 km i klase E, F i J su namjenjene za korištenje na dubinama većim od 3,1 km. Klase cementa A, C, G i H se tipično koriste za čepljenje; Stvaran odabir cementa ovisi o dubini bušotine, temperature formacije, svojstvu formacije i svojstvima fluida u bušotini.

Brojne tehnike utiskivanja cementa razvijene su kako bi pouzdano utisnuti cement određenih svojstava na veliku dubinu (Smith, 1989; API, 2000; Lyons i Plisga, 2005). Konačna cementna smjesa i metoda utiskivanja ovisit će o preporuci izvođača cementnih radova baziranoj na uvjetima u bušotini. Budući da će se faze cementa reagirati nakon postavljanja, pretpostavke o ponašanju tijekom perioda podešavanja moraju biti potpomognute modelom. (Berner, 1990; Thompson et al., 1996).

### **6.5.3. Testiranje i provjera brtvenog sloja**

Visoko prioritetno testiranje i provjera brtvenog sloja će uključivati (Arnold et al., 2011):

- Exsitu testiranje čvrstoće i propusnosti cementa, bentonita i miješavne bentonita s pijeskom.
- In situ ispitivanje čvrstoće može se postići primjenom vertikalnog opterećenja putem samog bušačkog postrojenja ili preko primjene tlaka ispod pakera, ako je ukupna propusnost formacije slaba.
- In situ ispitivanje propusnosti koristi paker za postavljanje tlaka iznad brtvenog sloja i mjeri prolazak tlaka kako bi se odredila propusnost sustava.
- Ispitivanje ubrzanog starenja komponenata materijala za brtvljenje. To se može postići primjenom temperature i koncentriranog fluida na uzorke brtvenih materijala, kako bi se odredilo njihovo starenje.
- Geokemijsko testiranje konstrukcije za optimizirano dovođenje u ravnotežu materijala sa okolinom bušotine, i za identifikaciju aditiva koji će potencijalno apsorbirati radionuklide.
- 

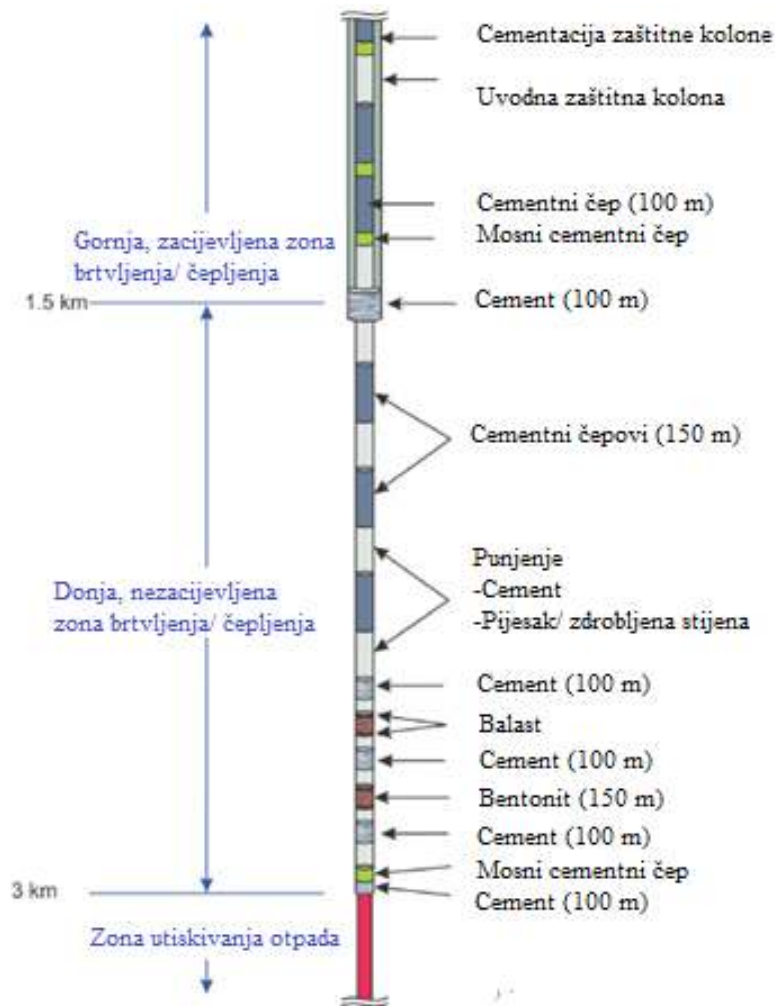
### **6.5.4. Referentna konstrukcija i operativni slijed**

Slika 6-5. prikazuje referentni dizajn brtvenog sloja. Niže, nezacijevljene sekcije će započeti iznad kolčka višestupanjske cementacije srednjeg/među lajnera. Između zadnjeg spremnika za otpad i kolčka višestupanjske cementacije biti će kratka sto metarska sekcija cementa da osigura oba brtvena sloja i neke toplinske izolacije iznad bušotine, na vrhu cementnog mosnog čepa. Brtveni sloj u bušotini uključuje niz serija materijala za brtvljenje odmah iznad zone odlaganja otpada i ispod cementnih čepova visoko u bušotini.

Cementne sekcije služe da ograniče ekspanziju bentonita i podupru težinu brtvenog i zatrpavajućeg sustava. Silikatni pijesak ili fino drobljena stijena odvajat će cement i glinu kako bi se smanjila moguća kemijska interakcija. Ostali dijelovi bušotine biti će napunjeni cementnim čepom. Duljina čepa je glavni faktor za dugovječnost, preporučuje se najmanja duljina čepa od 100 m. I od cementa i od bentonita se očekuje da do nekog stupnja prodru u pukotine moguće poremećene stijenske mase u području oko bušotine. Donje sekcije će također imati pijesak ili fino izdrobljenu stijenu dodanu za zapunjavanje, koja je kemijski kompatibilna sa stijenkom bušotine i brtvenim slojem, zbog usporenja skupljanja cementa i smanjenja ukupnih troškova čepjenja bušotine.

U gornjim, zacijevljenim sekcijama, bušotina će biti začepljena pretežno sa cementom ili s cementom pomješanim s pijeskom i kamenjem. Dno srednje zaštitne kolone biti će cementirano s čvrstim segmentom šire 50 m iznad i ispod pete zaštitne kolone. Iznad dna zaštitne kolone nalazit će se jedan ili više cementnih mosnih čepova. Američki naftni institut predlaže čepove u kojima je cementni mosni čep pozicioniran i prekriven stupcem cementa. Ovo je na vrhu s drugim cementnim mosnim čepom i drugim stupcem cementa. Ponovo će pijesak ili fino izdrobljena stijena popuniti preostala mjesta (Arnold et al., 2011).





Slika 6-5. Predložena konstrukcija brtvenog sloja (Arnold et al., 2011).

## 6.6. Zaključci i preporučeni dodatni rad

Sveukupno, rezultati razvoja referentne konstrukcije i analize troškova podupiru tehničku izvedivost koncepta odlaganja visoko radioaktivnog otpada u duboke bušotine. Bušenje i metode izrade bušotina potrebne za implementaciju koncepta odlaganja su unutar paketa sposobnosti za duboko bušenje i može biti ostvareno s prihvatljivim troškovima. Relativno jednostavna konstrukcija spremnika sa konsolidiranim člancima iskorištenog goriva osiguravaju dovoljan kapacitet za otpad i osiguranje integriteta spremnika kroz punjenje, rukovanje i odlaganje za spremnike za otpad. Rezultat gustog pakiranja šipki iskorištenog goriva u referentnu konstrukciju spremnika za otpad je u procjeni oko 700 bušotina za odlaganje otpada iz postojećih nuklearnih reaktora u SAD-u. Procijenjeni broj bušotina zahtijevanih za odlaganje netaknutih asemblija goriva je oko 950. (Brady et al.,

2009). Operativne procedure za odlaganje otpada i brtvljenje bušotina mogu biti ostvarene sa standardnom ili modificiranom standardnom bušotinskom opremom. Referentna konstrukcija i operativni program može biti korišten kao baza za planiranje pilot ili demonstracijskih projekata za koncept odlaganja otpada u duboke bušotine. Nekoliko aspekata pilot projekta može biti po uzoru na referentnu konstrukciju, uključujući:

Detalji karotaže, jezgrovanja i testiranja u dubokoj bušotini za karakterizaciju geoloških i hidrogeoloških uvjeta bitnih za sigurnost i izvedbu koncepta odlaganja u duboke bušotine. Alati i metode korištene u takvoj karakterizaciji su iste u naftnoj i geotermalnoj industriji, ali se obično ne koriste za te svrhe i na duboko bušotinskim odlagalištima. Oprema i metode mogu zahtijevati adaptaciju za korištenje u bušotinama velikih promjera.

Modeli spremnika za otpad za korištenje u testiranju. Testiranje punjenja, varenja i rukovanja spremnicima za otpad može biti učinjeno kao dio pilot projekta. Ispitivanje korozije u uvjetima dubokih bušotina će osigurati povjerenje da će spremnici zadržati svoj integritet na operativnoj vremenskoj skali. Insitu ispitivanja topline koristi modele spremnika za otpad može se koristiti za provjeru numeričkih modela toplinsko-hidrološki-mehaničkih procesa i osigurati povjerenje u integritet brtvenog sloja.

Postavljanje brtvenog sloja i uspješnost. Operativne procedure za postavljanje brtvenog sloja i čepova mogu biti opremljene i demonstrirane u pilot projektu. Mehanički i hidrološki integritet brtvenog sloja može biti ispitan u uvjetima duboke bušotine.

Inženjerski sustavi nadzemnih objekata. Naime, sistem za rukovanje transportnim spremnicima, njihovo pozicioniranje iznad bušotine i spuštanje spremnika za otpad u bušotinu može biti razvijen i demonstriran. Ostali inženjerski sustavi povezani s postavljanjem i praćenjem zahtijevati će preinake za specijalne zahtjeve odlagališta u duboke bušotine i može biti testirana u pilot projektu.

## **7. Utiskivanje raznih vrsta otpada**

### **7.1. Opasni otpad**

Upravljanje opasnim otpadom, prikupljanje, obrada i odlaganje mogu uzrokovati značajne štete za zdravlje i sigurnost ili okoliš, kada se njima nepropisno rukuje. Opasni otpad može biti u obliku krutina, tekućina, mulja ili može biti sadržaj plinova, oni se prvenstveno generiraju kroz proizvodnju, kemijsku proizvodnju ili neku drugu industrijsku aktivnost. Opasni otpad može uzrokovati štetu tijekom neadekvatnog skladištenja, transporta, obrade ili procesa zbrinjavanja. Nepravilno skladištenje ili odlaganje opasnog otpada često je uzrok zagađenja površinskih i podzemnih zaliha vode. Ljudi koji žive blizu starih i napuštenih odlagališta mogu biti u naročito osjetljivom položaju. U nastojanju da otklone postojeće probleme i kako bi se spriječilo buduće štetno djelovanje opasnog otpada, vlade temeljito reguliraju upravljanje opasnim otpadom (Nathanson, 2015).

U velikoj količini otpada koji dolazi iz industrije, trgovine, domaćinstva, zdravstva, poljoprivrede i iz drugih izvora nalazi se i otpad koji se po svojim fizikalnim, kemijskim i biološkim osobinama svrstava u opasni otpad.

Identifikacija opasnog otpada prema američkoj agenciji za zaštitu okoliša (USEPA, 2012):

- Materijal predstavlja opasni otpad ako ima jednu ili više karakteristika koje se mogu karakterizirati kao:

zapaljivost (uzrokuje ili pospješuje plamen),

reaktivnost (reagira s drugim materijama te pri čemu može nastati eksplozija),

korozivnost (oštećuje tkivo ili metal)

toksičnost (štetnost za zdravlje, vodu, hranu i zrak).

#### **7.1.1. Transport opasnog otpada**

Opasni otpad na određenom mjestu često zahtjeva transport do postrojenja za obradu, skladištenje ili odlaganje. Zbog potencijalnih opasnosti za javnu sigurnost i okoliš, promet ima posebnu pozornost vladinih agencija. Uz povremena slučajna izlivanja, u

prošlosti se opasni otpad namjerno proljevao ili ostavljao na raznim lokacijama, što je u praksi znano kao "ponoćni istovar". Ta praksa je uvelike ograničena donošenjem zakona koji zahtijevaju odgovarajuće označavanje, transport i praćenje svih opasnih otpada (Nathanson, 2015).

Opasni otpad u pravilu se transportira kamionima, javnim prometnicama. Samo vrlo mali dio se transportira željeznicom, a gotovo nikako zrakom ili unutarnjim plovnim putevima. Dostava autocestom je najčešća, jer cestovna vozila mogu pristupiti većini industrijskih područja i postrojenja za obradu, skladištenje i odlaganje. Vlakovi zahtijevaju skupe sporedne kolosijeke za prilazak i istovar vagona i pogodni su samo za velike pošiljke opasnog otpada.

Opasni otpad može biti isporučen u cisterni od čelika ili aluminijske legure, s kapacitetom do oko 34000 litara. Također može biti isporučen u spremnicima od 200 litara, koji se nalaze u kontejnerima.

U slučaju curenja ili sličnog izlivanja opasnog otpada tijekom transporta, prijevoznik mora odmah poduzeti odgovarajuće mjere, uključujući obavještanje lokalne vlasti o ispuštanju. Područje se mora okružiti žljebovima za sakupljanje otpada, te se moraju poduzeti svi napor za uklanjanje otpada i za smanjivanje opasnosti po okoliš i zdravlje ljudi (Nathanson, 2015).

### **7.1.2. Obrada opasnog otpada**

Opasni otpad se može tretirati kemijskim, toplinskim, biološkim i fizikalnim metodama. Kemijski postupci uključuju ionsku izmjenu, oborine, oksidaciju, redukciju i neutralizaciju. Među termalnim metodama je spaljivanje na visokim temperaturama, čime ne samo da se detoksificira organski otpad nego se on može i uništiti. Posebni uređaji za termičku obradu koriste se za spaljivanje otpada u krutom tekućem ili muljevitom obliku. Jedan od problema spaljivanja opasnog otpada je potencijalno onečišćenje zraka. Biološka obrada određenih organskih otpada, kao što su oni iz naftne industrije također je opcija.

Kemijska, toplinska i biološka metoda obrade mijenjaju molekularni oblik otpadnog materijala. Fizikalna obrada, s druge strane koncentrira, skrućuje ili smanjuje volumen otpada. Fizički procesi uključuju isparavanje, taloženje, plutanje i filtriranje. Otpad također može biti pomješan s vapnom, pepelom i vodom kako bi se dobio čvrsti cementni produkt (Nathanson, 2015).

### 7.1.3. Utiskivanje opasnog otpada

Osim odlaganja opasnog otpada u površinska odlagališta ili lagune, jedna od opcija je zbrinjavanje tekućeg opasnog otpada utiskivanjem u duboke bušotine. Postupak uključuje utiskivanje tekućeg otpada kroz čelične cijevi u porozne slojeve vapnenca ili pješčenjaka. Zona utiskivanja mora se nalaziti ispod sloja nepropusne stijene ili gline, i može se pružati 0.8 km ispod površine. Utiskivanje je relativno jeftin postupak i ne zahtijeva gotovo nikakvu predobradu otpada (Nathanson, 2015).

Za utiskivanje opasnog i neopasnog otpada u duboke, izolirane stijenske formacije koje se nalaze tisuće metara ispod razine podzemne vode, koriste se bušotine klase 1. Bušotine klase 1 uglavnom se koriste za otpade nastale u industrijama metala, rafinerijama za preradu nafte, kemijskoj proizvodnji, farmaceutskoj industriji, proizvodnji hrane i pročišćavanju otpadnih voda. Ove bušotine za utiskivanje opasnog otpada definirane su zakom o zaštiti i obnovi resursa (*Resource Conservation and Recovery Act*, RCRA). Većina utisnih bušotina klase 1 nalaze se u industrijskim postrojenjima (USEPA, 2012).

Na području Sjedinjenih Američkih Država nalaze se oko 550 bušotina za utiskivanje opasnog otpada klase 1. Geologija na području obale zaljeva (*the Gulf Coast*) i velikog jezera (*the Great Lake*) je najpogodnija za ovu vrstu bušotine. Bušotine za utiskivanje opasnog otpada nalaze se u desetak država, Texas ih ima 78, a Louisiana 18.

Svaka bušotina klase 1 radi pod dozvolom. Svaka dozvola vrijedi 10 godina. Vlasnici i operatori bušotina moraju ispunjavati posebne uvjete za dobivanje dozvole. Zahtijevi se odnose na lokaciju, izgradnju, rad, nadzor i ispitivanje, izvješća i vođenje evidencije, te zatvaranje bušotine (USEPA, 2012).

## 8. Rasprava i zaključak

Tijekom pisanja svog diplomskog rada, čitanja literature i razgovora sa ljudima iz struke saznao sam nešto više o problematici utiskivanja raznih vrsta otpada u duboke bušotine.

Utiskivanje otpada u pomno odabrane stijene ili u već postojeće bušotine iz kojih su iscrpljeni ugljikovodici osiguravaju sigurno, trajno i ekonomski najisplativije zbrinjavanje otpada. Te tri stavke važni su čimbenici za korištenje i unapređenje tehnologije zbrinjavanja otpada u podzemlje.

U RH se utiskivanje otpada već dugo vremena uspješno koristi za zbrinjavanje tehnološkog otpada iz naftne industrije, što je za naše prilike i mogućnosti premalo. Zbog još uvijek ne dovoljno uređene zakonske regulative i ne informiranosti građana, koji imaju strah za sve što ima prefiks opasno ili radioaktivno, RH ne zbrinjava opasan ili radioaktivan otpad, nego ga skladišti ili izvozi u druge zemlje. Hrvatska na području Petrove i Trgovske gore ima mogućnost za zbrinjavanje opasnog, te visoko, srednje i nisko radioaktivnog otpada, na tom području nalaze se debele formacije metamorfnih stijena (šejla i filita) koje su za to pogodne. Obije lokacije su prikladne za daljnja istraživanja, izradu projekata zbrinjavanja otpada, te za odlaganje prema konceptu odlaganja otpada u duboke bušotine čiji je samo jedan primjer opisan u ovom radu. Taj koncept bi se mogao razmotriti i uvrstiti u strategiju zbrinjavanja otpada u RH, jer je jeftiniji i sigurniji od površinskog ili podzemnog odlagališta otpada.

Po mom subjektivnom mišljenju na kraju ovog rada mogao bi zaključiti da je tehnologija u RH veoma primitivna i zastarjela te daleko od svojih potencijala i mogućnosti, koje bi osigurale sigurniji i ekonomičniji rad, te zbrinjavanje daleko više vrsta otpada od onoga što se danas u Hrvatskoj zbrinjava.

## Literatura

American Petroleum Institute (API), (2000). Guidance Document: Well Abandonment and Inactive Well Practices for U.S. Exploration and Production Operations. API Bulletin E3. First edition January 31, 1993; reaffirmed June 1, 2000. Washington D.C.

Bates, E.A., Driscoll, M.J. i Buongiorno J., (2011). Drop-in concept for deep borehole canister emplacement, Proceedings of the 13th International High Level Radioactive Waste Management Conference, Albuquerque, New Mexico, April 10-14, 2011, American Nuclear Society, La Grange Park, IL.

Arnold, B.W., Brady, P.V., Bauer S.J., Herrick, C., Pye, S. i Finger, J., (2011). Reference Design and Operations for Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico.

Brady P.V., Patrick V., Arnold B.W., Freeze G.A., Swift P.N., Bauer S.J., Kanney J.L., Rechard, R.P., Stein, J.S. (2009). Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste, SAND2009-4401, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

Brkić V., Omrčen I., Omrčen B., (2002). Disposal of Mercury Sulfide and Redisual Ash by Deep Well Injection, GWPC Annual Forum, September 22-25, San Francisco, USA.

Brkić,V., Karasalihović Sedlar, D. (2010). Prilagodba zakonske regulative Republike Hrvatske s direktivama Europske Unije iz područja zbrinjavanja naftno-rudarskog otpada u pogodne geološke naslage. Zagreb. Rudarsko-geološko-naftni zbornik.

European Waste Catalogue, (2002). Amended and Consolidated Version, Environment Agency

Gaurina-Međimurec, N., Durn, G., (2005). Postupanje s tehnološkim otpadom u naftnoj industriji, Studija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Gaurina-Međimurec, N., (2009). Utiskivanje otpada iz naftnog rudarstva u bušotine. Zagreb. RGNF Sveučilište u Zagrebu.

Gibbs, J.S., (2010). Feasibility of Lateral Emplacement in Very Deep Borehole Disposal of High Level Nuclear Waste, Dept. of Nuclear Engineering. Cambridge, MA, MIT.

INA d.d., (2005). Glavni rudarski projekt. Pokretno postrojenje za zbrinjavanje tehnološkog otpada iz procesa istraživanja i eksploatacije ugljikovodika u bušotinu za trajno zbrinjavanje, Zagreb.

INA d.d., (2007). Doplunski rudarski projekt. Utiskivanje tehnološkog otpada iz procesa istraživanja i eksploatacije ugljikovodika u utisnu bušotinu Kalinovac-6 na eksploatacijskom polju Kalinovac, Zagreb.

Greer, W.B. i Crouthamel, D.R., (1996). In situ hydraulic performance of cement borehole seals. In Sealing of Boreholes and Underground Excavations in Rock. Lyons, W.C. and G.J.

Heiken, G., Woldegabriel, G., Morley, R., Plannerer, H., Rowley, J., (1996). Disposition of Excess Weapon Plutonium in Deep Boreholes – Site Selection Handbook. Los Alamos, NM, Los Alamos National Laboratory.

Herrick, C., Arnold, B., Hadgu, T., Finley, R., Vaughn, P. i Brady, P., (2011). Deep Borehole Seals. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories.

Karnik J., Vidaković D., Dubovski S., Farkaš-Višontai L., (2012). Uputa za prihvata i utiskivanje. INA d.d. Zagreb.

Janković, B., (2002), Zbrinjavanje tehnološkog otpada utiskivanjem u podzemlje, Zagreb, RGNF, Sveučilište u Zagrebu

Muvrin, B., Maurović, L., Karasalihović, D., (2005). Zbrinjavanje tehnološkog otpada utiskivanjem u bušotine (Prikaz zakonodavstva SAD i RH), 3. međunarodni znanstveno-stručni skup o naftnom gospodarstvu, Zadar 4-7. listopada

N. N., 27/96., Pravilnik o vrstama otpada.

N.N., 23/14., 51/14., Pravilnik o gospodarenju otpadom.

N.N., 94/13., Zakon o održivom gospodarenju otpadom.

N.N., 75/09., Zakon o rudarstvu.

N.N., 153/09., Zakon o vodama.



Nathanson, A.J., (2015). Hazardous-waste management

<http://www.britannica.com/technology/hazardous-waste-management> (14.9.2015)

National Academy of Sciences (NAS), (1957). The Disposal of Radioactive Waste on Land. [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=10294](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=10294)

Neville, A.M., (1995). Properties of Concrete, 4th Edition, Pearson/Prentice-Hall, Harlow, England.

Nirex, (2004). A Review of the Deep Borehole Disposal Concept, Report N/108, United Kingdom Nirex Limited.

O'Brein, M.T, Cohen, L.H., Narasimhan, T.N., Simkin, T.L., Wollenberg, H.A., Brace, W.F., Green, S., Platt, H.P., (1979). The Very Deep Hole Concept: Evaluation of an Alternative for Nuclear Waste Disposal, Berkeley, CA, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7089.

Official Journal of the European Union (22. 12. 2000), (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy

Official Journal of the European Union (22.11.2008.), (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives

Onofrei, M., Gray M., Pusch, R., Börgesson, L., Kärnland, O., Shenton, B., Walker, B., (1992). Sealing Properties of Cement-Based Grout Materials. Stripa Project Technical Report 92-28. SKB, Stockholm.

Park, Y.J., Sudicky, E.A., i Sykes, J.F., (2009). Effects of shield brine on the safe disposal of waste in deep geologic environments, *Advances in Water Resources* **32**: 1352-1358.

Plisga, (2005). Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering, 2nd ed. Gulf Professional Publishing (Elsevier), Burlington, Mass.

Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada (N.N., 114/15.)

Pusch, R., (2008). Geological Storage of Highly Radioactive Waste: Current Concepts and Plans for Radioactive Waste Disposal. Springer-Verlag, Berlin.

Sanfillipo, F., Dusseault, M., Santarelli, F.J., (2009). Waste Disposal into Deep Underground-Technical and Economical Considerations for Applications Outside the Oil Industry, IPTC 13745, International Petroleum Conference, Doha, Qatar

Saling, J.H. i Audeen W.F., (2001). Radioactive Waste Management, 2nd edition, Taylor and Francis Publishers, New York.

Sanchez, Lawrence C., Rath J.S., Aquilar, R., Trellue, H.R., Cochran, K., Taylor, L.L., i Wilson, J.R., (1998). Nuclear Dynamics Consequence Analysis (NDCA) for the Disposal of Spent Nuclear Fuel in an Underground Geologic Repository, SAND98-2208, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

Smith, D.K., (1989). Cementing. SPE Monograph Series, Volume 4. Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas.

Strategija gospodarenja otpadom RH (N.N., 130/05.)

Šabović A., Isabegović J., (2012). Odlaganje otpada nastalog tokom istraživanja i eksploatacije nafte i plina pomoću bušotina utiskivanjem u podzemlje i mogućnost praćenja utiskivanja. Tuzla. Rudarski institut d.d. Tuzla.

Thompson, T.W., Coons, W.E., Krumhansl, J.L. i Hansen, F.D., (1996). Inadvertent Intrusion Borehole Permeability. ERMS 241131. Sandia National Laboratories, Carlsbad, NM.

Uredba o izmjenama i dopunama Uredbe o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada (N.N., 39/2009.)

U.S. Department of Energy, (1997). Integrated Database Report, DOE-IDB97, Washington, D.C.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), (1998).

United States Environmental Protection Agency (USEPA), (2012). Industrial & Municipal Waste Disposal Wells (Class I)

[http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/wells\\_class1.cfm](http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/wells_class1.cfm) (14.9.2015)

Woodward - Clyde Consultants (1983). Very Deep Hole Systems Engineering Studies. Columbus, OH, ONWI.

Filename: Bratko Diplomski rad - 5  
Directory: C:\Users\Bratko\Desktop  
Template: C:\Users\Bratko\AppData\Roaming\Microsoft\Templates\Normal.dotm  
Title:  
Subject:  
Author: Bratko  
Keywords:  
Comments:  
Creation Date: 16.11.2015. 19:54:00  
Change Number: 11  
Last Saved On: 19.11.2015. 18:40:00  
Last Saved By: Bratko  
Total Editing Time: 3.102 Minutes  
Last Printed On: 19.11.2015. 18:41:00  
As of Last Complete Printing  
Number of Pages: 74  
Number of Words: 19.847 (approx.)  
Number of Characters: 113.129 (approx.)